

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	11
Глава 1. Общие вопросы колебаний и распространения волн	16
1.1. Колебания гармонического осциллятора	16
1.1.1. Свободные колебания гармонического осциллятора без затухания	17
1.1.2. Свободные колебания гармонического осциллятора с затуханием	18
1.1.3. Вынужденные колебания гармонического осциллятора с затуханием	21
1.2. Распространение одномерной волны	26
1.2.1. Волновое уравнение для одномерной волны в среде без затухания	26
1.2.2. Свободное распространение одномерной волны в среде без затухания	27
1.2.3. Свободное распространение одномерной волны в среде с затуханием	30
1.2.4. Распространение одномерной волны заданной частоты в среде с затуханием	34
1.2.5. Распространение волны в рамках задачи без начальных условий	35
1.3. Энергетические характеристики одномерной волны	39
1.3.1. Плотность и поток энергии для волны в струне	39
1.3.2. Плотность и поток энергии для одномерной волны	42
1.3.3. Замечание о комплексных волновых числах	46
1.4. Распространение электромагнитной волны	47
1.4.1. Поля плоской поперечной электромагнитной волны правой поляризации	47
1.4.2. Волновые уравнения для полей электромагнитной волны	51
1.4.3. Баланс энергии для электромагнитной волны в среде с диссипацией	55
1.4.4. Аналогия между балансами энергии для электромагнитной и одномерной волны	56
1.5. Традиционные методы расчета распространения волн через многослойные структуры	59
1.5.1. Прямой метод	59
1.5.2. Метод усреднения	60
1.5.3. Метод характеристической матрицы	60
1.5.4. Метод импеданса	61

1.6. Некоторые математические приемы, полезные при рассмотрении распространения волн	61
1.6.1. Комплексная амплитуда	61
1.6.2. Квадратный корень из комплексного числа	63
1.6.3. Связь между тригонометрическими и гиперболическими функциями	65
1.6.4. Преобразование суммы синуса и косинуса в единый косинус	66
1.6.5. Представление комплексного числа в виде произведения действительного числа на экспоненту с мнимым показателем	67
1.6.6. Связь между волновым числом, показателем преломления, импедансом и фазовой скоростью волны	70
1.6.7. Основные физические величины электродинамики	71
Выводы по главе 1	72
Глава 2. Распространение волн через две среды, разделенные одной границей	74
2.1. Одномерная волна	74
2.1.1. Падение одномерной волны на одну границу раздела сред	74
2.1.2. Коэффициенты отражения и прохождения по амплитуде	77
2.1.3. Коэффициенты отражения и прохождения по энергии . . .	77
2.2. Электромагнитная волна	78
2.2.1. Падение электромагнитной волны по нормали на одну границу раздела двух сред	78
2.2.2. Коэффициенты отражения и прохождения по полям	81
2.2.3. Коэффициенты отражения и прохождения по энергиям . .	82
2.2.4. Наклонное падение электромагнитной волны на одну границу раздела двух сред	83
2.2.5. Возможные варианты поляризации падающей волны	85
2.2.6. Продольная поляризация	86
2.2.7. Поперечная поляризация	90
2.2.8. Коэффициенты отражения и прохождения	92
2.3. Векторная модель распространения одномерной волны через границу, разделяющую диссипативные среды	93
2.3.1. Общее тригонометрическое решение	93
2.3.2. Прохождение волны из мягкой среды в жесткую при диссипации в первой среде	96
2.3.3. Прохождение волны из мягкой среды в жесткую при диссипации во второй среде	98
2.3.4. Прохождение волны из жесткой среды в мягкую при диссипации в первой среде	100
2.3.5. Прохождение волны из жесткой среды в мягкую при диссипации во второй среде	103
2.3.6. Общий вывод по векторной модели	106
Выводы по главе 2	106

Глава 3. Распространение волн через три среды, разделенные двумя границами	108
3.1. Одномерная волна	108
3.1.1. Падение одномерной волны на две границы раздела сред. Прямой метод	108
3.1.2. Коэффициенты отражения и прохождения	111
3.1.3. Нормировка амплитуды волны, проходящей через структуру	112
3.1.4. Падение одномерной волны на две границы раздела сред. Метод усреднения	117
3.1.5. Сравнение методов прямого и усреднения для одномерной задачи	122
3.1.6. Пределы применимости метода усреднения в одномерном случае	123
3.2. Электромагнитная волна	125
3.2.1. Нормальное падение электромагнитной волны на две границы раздела. Прямой метод	125
3.2.2. Предельные случаи структуры из двух поверхностей	129
3.2.3. Нормальное падение электромагнитной волны на две границы раздела. Метод усреднения	130
3.2.4. Электродинамические граничные условия для тонкой пластины. Метод усреднения	135
3.2.5. Получение граничных условий задачи о нормальном падении волны из общих условий для метода усреднения	143
3.2.6. Наклонное падение электромагнитной волны на две границы раздела	145
3.2.7. Наклонное падение, продольная поляризация. Прямой метод	146
3.2.8. Наклонное падение, продольная поляризация. Метод усреднения	149
3.2.9. Наклонное падение, поперечная поляризация. Прямой метод	150
3.2.10. Наклонное падение, поперечная поляризация. Метод усреднения	152
3.2.11. Сведение электродинамических задач к одномерной	153
3.2.12. Оценка корректности метода усреднения для электромагнитной волны	154
Выводы по главе 3	160
Глава 4. Коэффициенты отражения и прохождения при наклонном падении электромагнитной волны на три среды, разделенные двумя границами	164
4.1. Общие определения коэффициентов отражения и прохождения	164
4.1.1. Коэффициенты отражения и прохождения относительно произвольных точек пространства	166
4.1.2. Обобщенные коэффициенты выхода	168

4.2. Некоторые численные примеры расчета коэффициентов отражения и прохождения	169
4.2.1. Амплитуды волн при продольной поляризации	169
4.2.2. Коэффициенты отражения и прохождения при продольной поляризации	174
4.2.3. Обращение в нуль коэффициента отражения при угле Брюстера	175
4.2.4. Большая толщина второй среды при продольной поляризации	181
4.2.5. Амплитуды волн при поперечной поляризации	182
4.2.6. Коэффициенты отражения и прохождения при поперечной поляризации	184
4.2.7. Большая толщина второй среды при поперечной поляризации	185
4.3. Отражение и прохождение волны в случае магнитной среды	186
4.3.1. Продольная поляризация	188
4.3.2. Поперечная поляризация	190
4.3.3. Отрицательная магнитная проницаемость	191
4.3.4. Волны в сложных магнитных структурах	191
4.4. Аномальное влияние проводимости первой среды	192
Выводы по главе 4	195
Глава 5. Прямой метод для многослойных структур	199
5.1. Общая схема прямого метода	199
5.2. Одномерная волна. Распространение двух встречных волн	200
5.2.1. Две среды, разделенные одной границей	200
5.2.2. Три среды, разделенные двумя границами	203
5.2.3. Четыре среды, разделенные тремя границами	206
5.2.4. Пять сред, разделенные четырьмя границами	209
5.2.5. Алгоритмическая схема последовательного вычисления коэффициентов отражения и прохождения	213
5.3. Электромагнитная волна. Распространение двух встречных волн	215
5.3.1. Геометрия распространения электромагнитных волн через слоистые структуры	215
5.3.2. Нормальное падение	215
5.3.3. Наклонное падение	216
5.3.4. Особенности трехмерного характера задач о распространении электромагнитных волн	219
5.3.5. Некоторые особенности геометрии распространения электромагнитных волн	221
5.3.6. Нормальное падение электромагнитной волны на структуру, состоящую из пяти сред	224
5.3.7. Нормальное падение электромагнитной волны на структуру, состоящую из трех и четырех сред	229
5.3.8. Схема вычисления коэффициентов отражения и прохождения для нормального падения	230

5.3.9. Наклонное падение электромагнитной волны на структуру, состоящую из пяти сред	232
5.3.10. Продольная поляризация	233
5.3.11. Поперечная поляризация	237
5.3.12. Наклонное падение электромагнитной волны на структуру, состоящую из трех и четырех сред	240
5.3.13. Схема вычисления коэффициентов отражения и прохождения для наклонного падения	245
5.4. Общий характер коэффициентов отражения и прохождения для многослойных структур.	246
Выводы по главе 5	248
Глава 6. Основы метода матрицы на примере простых структур. .	252
6.1. Некоторые полезные сведения из теории матриц	252
6.1.1. Матрица, как инструмент преобразования	252
6.1.2. Правила действий над матрицами и векторами в матричной записи	253
6.1.3. Некоторые полезные определения	255
6.1.4. Способ вычисления обратной матрицы	257
6.2. Общая схема метода матрицы	259
6.3. Матричные методы в различных областях применения.	261
6.4. Общее определение характеристической матрицы	263
6.5. Общая схема применения матриц для представления распространения волн через сложную структуру	264
6.5.1. Прямая и обратная матрицы для единичного участка волноведущей структуры	264
6.5.2. Прямая и обратная матрицы для произвольного числа участков волноведущей среды	266
6.5.3. Прямая матрица для двух участков волноведущей структуры	266
6.5.4. Прямая матрица при произвольном числе участков	268
6.5.5. Обратная матрица для двух участков волноведущей структуры	268
6.5.6. Обратная матрица при произвольном числе участков	269
6.6. Характеристическая матрица для волны, определяемой уравнением второго порядка	270
6.6.1. Прямая характеристическая матрица	271
6.6.2. Обратная характеристическая матрица	272
6.7. Характеристическая матрица для одномерной волны в экспоненциальном виде.	273
6.7.1. Прямая характеристическая матрица	273
6.7.2. Обратная характеристическая матрица	275
6.7.3. Упрощенный пример применения характеристических матриц	276

6.8. Применение метода матриц для задач о падении волны на границу	278
6.8.1. Отражение волны от границы	278
6.8.2. Прохождение волны через границу	281
Выводы по главе 6	283
Глава 7. Метод результирующей матрицы для одномерной волны	287
7.1. Метод матрицы для четырехполюсников	287
7.1.1. Определение четырехполюсников по их функциональному назначению	287
7.1.2. Два вида четырехполюсников по входам и выходам	288
7.1.3. Функциональный характер четырехполюсника	290
7.1.4. Замечание о направлении прохождения четырехполюсника	292
7.1.5. Результирующая матрица для цепочки из четырехполюсников	292
7.1.6. Замечание о порядке связи четырехполюсников	295
7.1.7. Цепочки из функционально различных видов четырехполюсников	296
7.2. Применение матричного аппарата четырехполюсников для волноведущей структуры	298
7.2.1. Общая постановка задачи	299
7.2.2. Результирующая матрица для двух сред, разделенных одной границей	300
7.2.3. Результирующая матрица для произвольного числа сред	303
7.2.4. Общая структура матрицы распространения (матрицы среды)	304
7.2.5. Общая структура матрицы связи (матрицы границы)	304
7.2.6. Замечание о произвольном числе сред	306
7.3. Применение матричного аппарата четырехполюсников для волн экспоненциального вида	307
7.3.1. Две однородные среды, разделенные одной границей	307
7.3.2. Матрица связи (матрица границы)	308
7.3.3. Матрицы распространения (матрицы сред)	309
7.3.4. Результирующие матрицы для структуры в целом	310
7.3.5. Матрицы распространения и связи для произвольного номера среды и границы	312
7.3.6. Три однородные среды, разделенные двумя границами	314
7.3.7. Замечание об экономии вычислений	316
7.3.8. Замечание о структуре результирующих матриц при произвольном числе сред	316
7.4. Метод матрицы передачи для одномерной волны	317
7.4.1. Общая схема метода	318
7.4.2. Матрица передачи для двух сред, разделенных одной границей	318
7.4.3. Матрица передачи для трех сред, разделенных двумя границами	320

7.4.4. Матрица передачи для многослойной структуры	323
7.4.5. Коэффициенты отражения и прохождения	324
7.4.6. Упрощенный вариант матрицы передачи для одного участка структуры	325
7.4.7. Результирующая матрица передачи для произвольного числа сред	326
7.5. Общая схема расчета распространения одномерных волн через многослойные структуры	327
7.5.1. Замечание о волновых уравнениях высоких порядков . . .	329
Выводы по главе 7	330
Глава 8. Метод результирующей матрицы для электромагнитной волны	334
8.1. Особенности распространения электромагнитных волн через многослойные структуры	334
8.2. Нормальное падение электромагнитной волны на структуру, содержащую произвольное число сред	335
8.2.1. Общая геометрия нормального падения	335
8.2.2. Результирующая матрица при произвольном числе сред	336
8.2.3. Нормальное падение в случае двух–пяти сред	338
8.2.4. Замечание о произвольном числе сред	342
8.3. Наклонное падение электромагнитной волны продольной поляризации	343
8.3.1. Общая геометрия наклонного падения	343
8.3.2. Углы прохождения и отражения	344
8.3.3. Результирующая матрица при произвольном числе сред	344
8.3.4. Наклонное падение в случае двух–пяти сред	346
8.4. Наклонное падение электромагнитной волны поперечной поляризации	350
8.4.1. Общая геометрия наклонного падения	350
8.4.2. Углы прохождения и отражения	350
8.4.3. Результирующая матрица при произвольном числе сред	350
8.4.4. Наклонное падение в случае двух–пяти сред	352
8.5. Коэффициенты отражения, прохождения и выхода	355
8.5.1. Коэффициенты отражения и прохождения	355
8.5.2. Обобщенные коэффициенты выхода	356
8.5.3. Коэффициенты отражения, прохождения и выхода при нормальном падении двух встречных электромагнитных волн на структуру из двух–пяти сред	357
Выводы по главе 8	361
Глава 9. Применение метода результирующей матрицы для расчета падения волны на наклонный барьер	364
9.1. Алгоритм расчета отражения и прохождения волны через многослойную структуру	364
9.1.1. Общая постановка задачи	364
9.1.2. Получение матриц распространения и связи	366

9.1.3. Структура цепочки из четырехполосников	369
9.1.4. Последовательное вычисление элементов результирующей матрицы	370
9.1.5. Результирующая матрица для произвольного числа сред	374
9.1.6. Переход от цепочки четырехполосников к волноведущей структуре	376
9.1.7. Коэффициенты отражения и прохождения	377
9.1.8. Схема пошагового определения амплитуд выходящих волн	378
9.1.9. Блок-схема алгоритма	379
9.2. Применение матричного алгоритма для расчета падения волны на наклонный барьер	380
9.2.1. Геометрические и волноведущие параметры структуры	380
9.2.2. Дискретная вариация длины барьера	384
9.2.3. Непрерывная вариация длины барьера	387
9.2.4. Вариация длины первого участка	390
9.2.5. Характерные области изменения волнового числа	392
9.2.6. Критерии осцилляций и хаоса	395
9.2.7. Кратное изменение зависимостей коэффициентов от длины барьера	397
9.2.8. Отражение и прохождение при большой длине структуры	398
9.2.9. Модель переотражений	402
9.2.10. Обобщение на электромагнитные волны	405
9.2.11. Замечание о возможности других решений	406
Выводы по главе 9	406
Литература	411