

С.М. Аполлонский

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

**Методы математической физики
и их использование при моделировании
электромагнитных полей**

Том 2

С.М. Аполлонский

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
И РАСЧЕТ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПОЛЕЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВАХ**

**Методы математической
физики и их использование
при моделировании
электромагнитных полей**

Том 2

Монография

RU
science
RU-SCIENCE.COM

Москва
2017

УДК 621.3
ББК 31.2
А76

Аполлонский, Станислав Михайлович.

А76

Моделирование и расчет электромагнитных полей в технических устройствах. Методы математической физики и их использование при моделировании электромагнитных полей. Том 2 : монография / С.М. Аполлонский. — Москва : РУСАЙНС, 2017. — 288 с.

ISBN 978-5-4365-1986-9

Книга разработана на основании государственных образовательных стандартов высшего образования по направлениям подготовки дипломированного специалиста «Электротехника и электромеханика», «Электроснабжение», «Промышленная электроника» (специальности: «Электроснабжение», «Электромеханика», «Электрические и электронные аппараты», «Промышленная электроника»); по направлениям подготовки бакалавров: «Электроэнергетика», «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», «Электроника и микроэлектроника»; по направлению подготовки магистров: «Электроэнергетика и электротехника».

В книге рассмотрены прикладные задачи электромагнитного поля в статических, квазистатических и переходных режимах. Для каждого уровня задач дан рациональный алгоритм расчета. Задачи касаются рассмотрения распределения электромагнитного поля в свободном пространстве; в ограниченных средах; в электротехнических устройствах. Рассмотрены задачи промышленного экранирования и расчета электромагнитного поля в реальных средах.

Книга предназначена для учащихся высших электротехнических учебных заведений по направлениям подготовки бакалавров, специалистов и магистров. Может оказаться полезной для аспирантов того же профиля, научно-исследовательских и практических работников, занятых на предприятиях с электротехническими комплексами.

**УДК 621.3
ББК 31.2**

ISBN 978-5-4365-1986-9

© Аполлонский С.М., 2017
© ООО «РУСАЙНС», 2017

Оглавление

Предисловие	7
Часть I. Освоение ЭМП первого уровня (для изучающих ЭМП в высших электротехнических учебных заведениях по направлениям подготовки бакалавров))	8
Глава 1. Магнитные цепи	8
1.1. Основные величины МП	8
1.2. Магнитные свойства веществ	10
1.3. Характеристики магнитных цепей	13
1.4. Законы магнитных цепей	14
1.5. Расчет магнитных цепей	16
1.5.1. Расчет линейных магнитных цепей	16
1.5.2. Расчет нелинейных магнитных цепей	17
1.5.3. Примеры расчетов простейших магнитных цепей	23
Глава 2. Общие сведения об ЭМП	30
2.1. Векторы ЭМП	30
2.2. Напряженность и потенциал ЭП	31
2.2.1. Напряженность ЭП	31
2.2.2. Потенциал ЭП	34
2.2.3. Примеры расчета	35
2.3. Магнитная индукция и магнитный поток	37
2.3.1. Магнитная индукция	37
2.3.2. Магнитный поток	41
2.3.3. Расчет магнитного потока в катушке с кольцевым магнитопроводом	43
2.4. Распространение ЭМП	45
2.5. Спектр частот ЭМП	47
Глава 3. Расчёт параметров среды в ЭМП	53
3.1. Понятие о сопротивлении и индуктивности в случае пространственных токов	53
3.2. Расчет индуктивностей	53
3.2.1. Потокосцепление индуктивных катушек	53
3.2.2. Расчет собственных индуктивностей	56
3.2.3. Индуктивность электрических линий	58
3.2.4. Расчет внутренней индуктивности проводов	63
3.3. Расчет взаимных индуктивностей и индуктивных связей	65
3.3.1. Расчет взаимных индуктивностей	65
3.3.2. Расчет индуктивных связей	70

3.4. Расчет электрических емкостей.....	74
3.4.1. Понятие об электрической емкости.....	74
3.4.2. Типовые задачи по расчету емкости.....	76
Глава 4. Электромагнитные свойства среды.....	81
4.1. Макроскопические параметры среды.....	81
4.2. Связь векторов поля в поляризуемых средах.....	85
4.3. Разграничение материала по электропроводности.....	87
Глава 5. Расчёты ЭСП.....	90
5.1. Основные аналитические зависимости.....	90
5.2. Расчёты симметричных полей.....	92
5.3. Расчёты напряженностей полей наложением.....	96
5.4. Метод зеркальных отображений.....	98
Глава 6. Расчёты ЭП от постоянных токов.....	100
6.1. Основные аналитические зависимости.....	100
6.2. ЭП в проводящей среде.....	102
Глава 7. Расчёты МП от постоянных токов.....	104
7.1. Основные аналитические зависимости.....	104
7.2. Закон полного тока. Скалярный магнитный потенциал.....	106
7.3. Расчёт МП методом зеркальных отображений.....	107
7.4. Расчёт МП с использованием закона Био-Савара.....	108
7.5. Расчёт МП в веществе.....	109
Глава 8. Расчёты квазистатических ЭМП.....	111
8.1. Основные аналитические зависимости.....	111
8.2. ЭДС, наводимые в телах и контурах.....	113
8.3. Особенности распространения ЭМП в проводящей среде.....	125
Глава 9. Переход от уравнений ЭМП к уравнениям цепи.....	128
9.1. Электромагнитное поле как особое состояние материи.....	128
9.2. Соотношения между основными величинами, характеризующими ЭМП.....	129
9.3. Соотношения между основными величинами, характеризующими цепь.....	135
9.4. Разделение электротехнических задач на цепные и полевые.....	138
Часть II. Освоение ЭМП второго уровня (для изучающих ЭМП в высших электротехнических учебных заведениях по направлениям специалистов и магистров).....	141
Глава 10. Расчёты ЭСП.....	141
10.1. Основные аналитические зависимости.....	141
10.2. Расчёт ЭП методом участков.....	143

10.3. Расчёт ЭП методом зеркальных отображений	145
10.4. Расчёт ЭП методом средних потенциалов (Метод ХОУ).....	153
10.5. Метод расчёта ЭСП, использующий понятия потенциальных коэффициентов, частичных ёмкостей	154
Глава 11. Расчёты ЭП от постоянных токов.....	159
11.1. Расчёты ЭП с использованием закона Ома, Кирхгофа и Джоуля-Ленца	159
11.2. Определение проводимостей и токов утечки.....	160
11.3. Расчёт ЭП методом отображений.....	160
11.4. Расчёт постоянного ЭП в неоднородной проводящей среде	164
Глава 12. Расчёт МП от постоянных токов.....	167
12.1. Расчёт МП методом зеркальных отображений	167
12.2. Расчёт МП с помощью закона Био-Савара.....	171
12.3. Графическое построение картины МП	180
12.4. Расчёт индуктивностей.....	182
Глава 13. Расчёты квазистатических ЭМП	186
13.1. Расчёт ЭМП в магнитопроводах.....	186
13.2. Расчёт ЭМП с учётом поверхностного эффекта	199
Глава 14. Расчёты ЭМП в реальных средах.....	213
14.1. Параметры реальных сред.....	213
14.2. Реальные среды в стационарном ЭП.....	213
14.2.1. Общие сведения.....	213
14.2.2. Объемные плотности свободного и связанного зарядов	214
14.2.3. Граничные условия на поверхности раздела реальных сред...216	
14.2.4. Типовые задачи.....	217
14.3. Реальные среды в переменном ЭП.....	219
14.3.1. Уравнение непрерывности для вектора плотности полного тока	219
14.3.2. Уравнение непрерывности для вектора полного смещения221	
14.3.3. Граничные условия на поверхности раздела двух реальных сред	222
14.4. Реальные среды в синусоидально изменяющемся ЭМП.....	223
14.4.1. Комплексная проводимость и комплексная диэлектрическая проницаемость	223
14.4.2. Граничные условия на поверхности раздела для реальных сред для комплексных векторов поля.....	225
14.5. Решение уравнений Максвелла для реальных сред.....	225
14.5.1. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме	225
14.5.2. Типовые задачи.....	227

14.6. Переходные процессы в реальных средах.....	229
14.6.1. Общие соображения.....	229
14.6.2. Типовые задачи.....	230
Глава 15. Расчёты распространения ЭМП.....	235
15.1. Энергия и импульс ЭМВ.....	235
15.2. Излучающие диполи.....	241
15.3. Излучение антенных устройств, прием и передача сигналов.....	251
Глава 16. Расчёт экранирующих функций в технических устройствах методом теории длинной линии.....	254
16.1. Метод полных сопротивлений.....	254
16.2. Расширенный метод полных сопротивлений.....	259
16.3. Экранирование при решении практических задач.....	266
16.3.1. Экраны в строительных конструкциях.....	266
16.3.2. Естественные природные экраны.....	271
Библиографический список.....	285