



**Аполлонский С. М.**

**Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле:  
Учебное пособие. 1-е изд.**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140400 — «Техническая физика» и 220100 — «Системный анализ и управление»*

**ISBN 978-5-8114-1155-9**

**Год выпуска 2012**

**Тираж 1000 экз.**

**Формат 16,5 × 23,5 см**

**Переплет: твердый**

**Страниц 592**

**Цена 1 549,90 руб.**

Пособие разработано на основании государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования и предназначено для студентов очной, заочной и очно-заочной форм обучения по направлениям подготовки «Техническая физика», «Системный анализ и управление», изучающих дисциплину «Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле».

Пособие может быть использовано студентами всех форм обучения по направлениям подготовки «Энергетическое машиностроение» и «Электроэнергетика и электротехника», сталкивающимися с необходимостью изучения электромагнитного поля, а также магистрами, аспирантами и инженерно-техническими работниками электротехнических направлений.

**Рецензенты:**

*К. Р. МАЛАЯН* — профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ); *М. А. ШАКИРОВ* — доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ); *А. Н. ГОРСКИЙ* — доктор технических наук, профессор кафедры ТОЭ Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения (СПбГУПС); *Ю. П. КОСЬКИН* — заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеканика и электромеханотроника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ).

**Введение**

Учебное пособие «Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле» включает материал части 3. «Электромагнитное поле» курса «Теоретические основы электротехники», читаемый электротехническим и энергетическим специальностям вузов. Изучать его следует после освоения части 1 «Линейные электрические цепи» и части 2 «Переходные процессы в линейных электрических цепях. Нелинейные электрические цепи».

Пособие содержит материал, излагаемый автором в лекциях для студентов очной, заочной и очно-заочной форм обучения всех специальностей в Северо-Западном государственном заочном техническом университете.

Содержание учебного пособия соответствует государственным стандартам по высшему профессиональному образованию. При его разработке учитывались особенности получения высшего образования в условиях обучения без отрыва от трудовой деятельности. Все теоретические выкладки и практические расчеты производятся так, что студент может самостоятельно разобраться в их содержании и оценить полученный результат.

В пособии использованы традиционные материалы, излагаемые в аналогичных курсах, как то: методы моделирования и расчета электромагнитных полей в свободном пространстве и в ограниченных областях; распространение электромагнитных полей; энергия и механические проявления электромагнитного поля; поверхностные эффекты в электромагнитном поле; методы расчета электромагнитных полей. Кроме этого, уделено внимание вопросам электромагнитной совместимости технических средств и человека, оказавшегося в электроэнергетических системах, вопросам выбора защитных средств, в том числе экранирования.

При подготовке пособия использовались как известные фундаментальные учебники и книги, ссылки на которые приведены в каждой главе, так и публикации автора.

Учебное пособие состоит из 25 глав. Теоретический материал дополнен большим количеством примеров расчета. Этого может оказаться достаточно для решения большинства практических инженерных задач.

Материал разбит на три части. В первой части (11 глав) приведены методы расчета электромагнитных полей, которые обязательны для изучения. Во второй части (7 глав) рассмотрены типовые задачи по основным видам электромагнитного поля, позволяющие практически освоить теоретический материал, содержащийся в первой части. В

третьей части (7 глав) приведен материал, который носит дополнительный характер. В зависимости от специальности и формы обучения некоторые из глав в третьей части можно изучать частично или исключать из рассмотрения совсем.

Более подробные разъяснения по объему учебного материала следует получить у преподавателя, ведущего занятия по данной дисциплине.

---

Аполлонский С. М.

Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле:  
Учебное пособие. 1-е изд

**Оглавление**

Введение ..... 5

Список принятых обозначений и сокращений ..... 7

Принятые обозначения ..... 7

Принятые сокращения ..... 7

Часть первая. Методы расчета электромагнитных полей

Глава 1. Общие сведения об электромагнитном поле ..... 10

1.1. Векторы электромагнитного поля ..... 10

1.2. Напряженность и потенциал электрического поля ..... 11

1.3. Магнитная индукция и магнитный поток ..... 16

Глава 2. Электромагнитное поле в окружающей среде ..... 24

2.1. Аналитическая связь между электрическими и магнитными явлениями ..... 24

2.2. Принцип непрерывности магнитного потока и тока ..... 30

2.3. Теоремы Остроградского и Стокса ..... 31

2.4. Полная система уравнений Максвелла ..... 32

2.5. Преобразование уравнений Максвелла ..... 32

2.6. Потенциалы ЭМП ..... 33

2.7. Электромагнитное поле в низкочастотном приближении ..... 35

2.8. Уравнения математической физики, описывающие электромагнитные поля ..... 36

Глава 3. Частные модели электромагнитного поля ..... 38

3.1. Модели статических электромагнитных полей ..... 38

3.2. Модели магнитного поля стационарных токов ..... 40

3.3. Модели квазистатических электромагнитных полей ..... 45

3.4. Модель нестационарных электромагнитных полей ..... 45

Глава 4. Граничные условия на поверхностях раздела различных сред ..... 46

4.1. Общий подход к решению граничных задач ..... 46

4.2. Граничные условия в магнитном поле ..... 47

4.3. Граничные условия в электрическом поле ..... 52

4.4. Граничные условия в электромагнитном поле ..... 57

Глава 5. Электромагнитные свойства среды ..... 59

5.1. Макроскопические параметры среды. Виды сред ..... 59

5.2. Связь векторов поля в поляризуемых средах ..... 62

5.3. Разграничение материала по электропроводности ..... 64

Глава 6. Методы расчета и моделирования статических и квазистатических полей ..... 67

6.1. Метод зеркальных отображений ..... 67

6.2. Метод разделения переменных ..... 75

6.3. Метод конформных отображений ..... 80

Глава 7. Методы расчета переходных процессов в электромагнитном поле ..... 87

7.1. О расчете переходных процессов в электромагнитном поле ..... 87

7.2. Установление магнитного потока в пластине ..... 88

7.3. Установление тока в проводе круглого сечения ..... 91

7.4. Экранирование импульсного магнитного поля круговой цилиндрической оболочкой ..... 94

Глава 8. Распространение электромагнитного поля ..... 100

8.1. Уравнения Максвелла в символической форме записи ..... 100

8.2. Уравнения Максвелла в проводящей среде ..... 101

8.3. Плоская электромагнитная волна в проводящей среде ..... 102

8.4. Теорема Умова–Пойнтинга ..... 104

8.5. Теорема Умова–Пойнтинга в комплексной форме ..... 110

Глава 9. Электромагнитные поля и волны ..... 112

9.1. Возникновение электромагнитных волн ..... 112

9.2. Плоская электромагнитная волна. Бегущие волны ..... 115

9.3. Монохроматическая плоская электромагнитная волна ..... 118

9.4. Описание электромагнитного поля с помощью стоячих волн ..... 119

9.5. Энергия и импульс электромагнитной волны ..... 120

9.6. Симметричные волны ..... 124

9.7. Излучение диполя ..... 125

9.8. Излучение радиоволн ..... 126

9.9. Распространение плоских радиоволн в полупроводящей среде .....	128
9.10. Направляющие системы .....	132
9.11. Распространение электромагнитных волн по коаксиальной линии .....	138
Глава 10. Энергия и механические проявления электромагнитного поля .....	142
10.1. Энергия и механические проявления магнитного поля в линейных средах .....	142
10.2. Энергия магнитного поля в нелинейных средах .....	152
10.3. Энергия и механические проявления электрического поля в линейных средах .....	158
Глава 11. Электромагнитные поля в движущихся средах .....	165
11.1. Уравнения электромагнитного поля в движущейся среде .....	165
11.2. Электромагнитное поле во вращающихся преобразователях .....	168
11.3. Униполярные электрические преобразователи .....	179
11.4. Магнитогидродинамические преобразователи .....	183
11.5. Расчет электромагнитных полей в перемещающихся средах .....	187
<u>Часть вторая. Практическое изучение теории электромагнитного поля</u>	
Глава 12. Расчет сопротивлений, индуктивностей и емкостей в электромагнитном поле .....	198
12.1. Понятие о сопротивлении и индуктивности в случае пространственных токов .....	198
12.2. Расчет индуктивностей .....	199
12.3. Расчет взаимных индуктивностей и индуктивных связей .....	208
12.4. Расчет электрических емкостей .....	215
Глава 13. Расчеты электростатических полей .....	220
13.1. Методы расчета электростатических полей .....	220
13.2. Расчет симметричных полей .....	225
13.3. Расчет напряженностей полей наложением .....	234
13.4. Расчет напряженностей полей с использованием уравнений Лапласа и Пуассона .....	236
13.5. Метод зеркальных отображений .....	240
13.6. Методы расчета с использованием электростатических коэффициентов .....	246
13.7. Расчет сил, моментов и энергии в электростатическом поле .....	248
Глава 14. Расчеты электрических полей от постоянных токов .....	255
14.1. Методы расчета электрических полей .....	255
14.2. Электрическое поле в проводящей среде .....	258
14.3. Энергия, силы и моменты в электрическом поле .....	270
Глава 15. Расчеты магнитных полей от постоянных токов .....	278
15.1. Методы расчета магнитных полей .....	278
15.2. Закон полного тока. Скалярный магнитный потенциал .....	280
15.3. Векторный магнитный потенциал .....	286
15.4. Метод наложения .....	289
15.5. Метод зеркальных отображений .....	290
15.6. Расчет магнитных полей с помощью закона Био–Савара .....	291
15.7. Силы, моменты и энергия в магнитном поле .....	295
15.8. Поля на значительном удалении от источников .....	309
15.9. Магнитное поле в веществе .....	310
Глава 16. Расчеты квазистатических электромагнитных полей .....	316
16.1. Условия квазистатичности .....	316
16.2. ЭДС, наводимые в телах и контурах .....	317
16.3. Силы и энергия в электромагнитном поле .....	324
16.4. Расчет емкости трехфазной линии электропередачи .....	333
Глава 17. Расчеты электромагнитных излучений .....	340
17.1. Распространение плоских радиоволн в полупроводящей среде .....	340
17.2. Распространение электромагнитных волн по волноводам .....	344
17.3. Электромагнитное поле в резонаторах .....	352
17.4. Потери мощности в волноводе .....	357
Глава 18. Переход от уравнений поля к уравнениям цепи .....	361
18.1. Электромагнитное поле как особое состояние материи .....	361
18.2. Соотношения между основными величинами, характеризующими поле .....	362
18.3. Соотношения между основными величинами, характеризующими цепь .....	367
18.4. Разделение электротехнических задач на цепные и полевые .....	369
<u>Часть третья. Расчеты электромагнитных полей в инженерных задачах</u>	
Глава 19. Электромагнитные поля в реальных средах .....	374
19.1. Параметры реальных сред .....	374
19.2. Реальные среды в стационарном электрическом поле .....	375
19.3. Реальные среды в переменном электрическом поле .....	379
19.4. Реальные среды в синусоидально изменяющемся поле .....	382
19.5. Решение уравнений Максвелла для реальных сред .....	383
19.6. Переходные процессы в реальных средах .....	386
Глава 20. Электрические токи в земле и в строительных конструкциях .....	391
20.1. Возникновение токов в земле .....	391

20.2. Заземлители. Потенциал точечного источника .....	393
20.3. Влияние земной поверхности .....	395
20.4. Характеристики поля вдоль земной поверхности .....	397
20.5. Изображение стационарного поля тока в земле в виде электростатического поля .....	398
20.6. Простые заземлители в однородной почве .....	399
20.7. Примеры расчета характеристик разных видов заземлителей .....	401
20.8. Поверхностный заземлитель в слоистой почве .....	409
20.9. Глубоко расположенный заземлитель в слоистой почве .....	416
20.10. Токи в строительных конструкциях .....	419
20.11. Электрохимическая коррозия металлов .....	425
Глава 21. Электромагнитное поле в электротехнических устройствах .....	437
21.1. Поверхностный эффект в электротехнических устройствах .....	437
21.2. Эффект близости для двух параллельных токопроводящих шин .....	443
21.3. Распространение электромагнитного поля в коаксиальном кабеле .....	445
Глава 22. Электромагнитная совместимость в электротехнических устройствах .....	450
22.1. Совместимость в технической системе .....	450
22.2. Электромагнитная среда и ее формирование .....	452
22.3. Помехи, обусловленные внешними электромагнитными полями .....	453
22.4. Расчет внешних электромагнитных полей .....	458
22.5. Средства снижения внешних электромагнитных полей .....	459
22.6. Стандарты и нормативные документы электромагнитной совместимости .....	462
Глава 23. Экранирование электромагнитных полей .....	471
23.1. Назначение экранирования .....	471
23.2. Экранирование пассивное .....	473
23.3. Экранирование активное .....	490
Глава 24. Расчет электромагнитных полей в анизотропных средах .....	502
24.1. Электротехнические материалы с анизотропными свойствами .....	502
24.2. Стационарные электрические и магнитные поля .....	503
24.3. Квазистационарные электрические и магнитные поля .....	514
24.4. Волновые процессы в средах со структурной анизотропией .....	516
24.5. Расчет анизотропных экранов .....	517
Глава 25. Электромагнитная экология .....	528
25.1. Предмет электромагнитной экологии .....	528
25.2. Человек и электромагнитная среда .....	529
25.3. Электромагнитные поля естественного происхождения .....	531
25.4. Электромагнитные поля искусственного происхождения .....	532
25.5. Электромагнитные поля человека .....	533
25.6. О механизмах воздействия электромагнитных полей на человека .....	535
25.7. Гигиеническое нормирование ЭМП и нормативная документация по электромагнитной экологии человека .....	536
25.8. Электромагнитная безопасность жилища .....	554
25.9. Заключение .....	564

## Приложение

Вспомогательные операции математики .....	566
Наиболее употребительные системы координат .....	566
Элементы векторной алгебры .....	566
Скалярные произведения векторов .....	567
Векторные произведения векторов .....	567
Дифференциальные операторы векторного анализа .....	567
Дифференциальные операторы в ортогональных криволинейных координатах $\{q_1, q_2, q_3\}$ .....	568
Принятые в литературе единицы измерения .....	569
Сводка применений дифференциального оператора $\nabla$ .....	570
Уравнения Максвелла в обобщенных ортогональных координатах $\{q_1, q_2, q_3\}$ .....	570

[Библиографический список .....](#) 571

[Предметный указатель .....](#) 578

---