

А.Е.КАПЛЯНСКИЙ, А.П.ЛЫСЕНКО,
Л.С.ПОЛОТОВСКИЙ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

А Е КАПЛЯНСКИЙ, А П ЛЫСЕНКО, Л С ПОЛОТОВСКИЙ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

*Под редакцией
доктора технических наук
профессора А. Е. КАПЛЯНСКОГО*

*Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования РСФСР
в качестве учебного пособия
для неэнергетических вузов*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

Книга предназначена для студентов электротехнических, приборостроительных и радиотехнических высших учебных заведений и факультетов. Ее содержание соответствует утвержденной программе курса „Теоретические основы электротехники“.

Книга состоит из четырех частей — „Физические основы электротехники“, „Теория электрических и магнитных цепей постоянного тока“, „Теория цепей переменного тока“ и „Теория электромагнитного поля“.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Существующие в настоящее время учебники по теоретическим основам электротехники московских и ленинградских авторов, с каждым новым изданием совершенствуемые и дополняемые, вследствие своего большого объема вышли за рамки учебников в собственном смысле слова. Поэтому авторы предлагаемой книги поставили себе задачу создать учебник по данной дисциплине, значительно меньший по объему и в то же время полностью удовлетворяющий утвержденной программе курса.

Краткость изложения материала достигнута благодаря широкому использованию аналогий между полями и между цепями различной физической природы, применению более простых выводов и доказательств, а также за счет исключения некоторых вопросов, имеющих второстепенный характер или входящих в программу специальных электротехнических и радиотехнических курсов.

Авторы являются сторонниками взгляда, что курс ТЭЭ должен начинаться с физических основ электротехники, но изложенных как первая инженерная дисциплина. В этой части на основе представлений, полученных в курсе физики, изучаются методы расчета простых электрических и магнитных полей и процессы преобразования энергии, имеющие первостепенное значение в электротехнике.

Теория цепей постоянного тока выделена во вторую часть. Этот прием позволил объединить в первой части родственные по духу темы электрического и магнитного полей, а во второй — электрических и магнитных цепей и более плодотворно использовать метод аналогий в обеих частях.

Изучение теории цепей переменного тока в третьей части облегчается тем, что изложение ведется на основе аналогий с методами расчета цепей постоянного тока и тем, что в первой части дан достаточный материал по расчету параметров цепей — емкости, сопротивления и индуктивности. Здесь более широко, чем обычно, используется теория дуальных цепей.

Основной методический прием, позволивший сократить объем четвертой части — теории электромагнитного поля, заключается в выделении раздела постоянных полей и изучении методов их расчета независимо от природы полей по виду их уравнений. Затем рассматривается постоянное электромагнитное поле и вектор Пойн-

тинга, обычно трудно воспринимаемый, если он впервые вводится для переменного поля.

Достигнутая экономия позволила осветить некоторые важные вопросы, новые для учебников ТОЭ, например основы синтеза электрических цепей, электромагнитное экранирование и переходные процессы в электромагнитном поле.

Авторы всюду стремились расчетную методику излагать после освещения физической стороны процессов и иллюстрировать ее типичными примерами.

Книга написана так, что ею можно пользоваться и в тех вузах, где изучение ТОЭ начинают с теории цепей. В этом случае изучаются вторая, третья и четвертая части книги, а из первой части используется материал по расчету простых постоянных полей и преобразованию энергии.

Авторами учтены материалы проходившей в Ленинграде в январе 1958 г. межвузовской научно-методической конференции по ТОЭ, позволившей авторам ознакомиться с методами работы кафедр ТОЭ почти всех вузов СССР.

Обоснование принятого в книге построения, последовательности и метода изложения курса, рекомендации по выбору задач для упражнений, домашних заданий и работ в лаборатории, а также по проведению всех видов учебных занятий приведены в книге А. Е. Каплянского «Методика преподавания теоретических основ электротехники» (Госэнергоиздат, 1959).

Автором первой части книги является кандидат технических наук доцент Л. С. Полотовский, второй и третьей — доктор технических наук профессор А. Е. Каплянский, четвертой — кандидат технических наук доцент А. П. Лысенко (главы 25—29 и 35) и Л. С. Полотовский (главы 24, 30—34).

Авторы благодарят товарищей, давших критические замечания по ранее вышедшим учебным пособиям — «Физические основы электротехники» А. Е. Каплянского и Л. С. Полотовского и «Теория электромагнитного поля» А. П. Лысенко, а также выражают признательность рецензенту — доктору технических наук профессору Г. Е. Пухову и редактору — доктору технических наук профессору Д. М. Казарновскому за их ценные указания.

Авторы будут благодарны читателям за сообщение критических замечаний, в особенности связанных с опытом использования предлагаемого учебника в преподавании. Просьба направлять письма по адресу: Ленинград, Д-41, Марсово поле, 1, Л. О. Госэнергоиздата.

Авторы

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

<i>Глава первая. Электротехника и ее теоретические основы</i>	11
1-1. Электрическая энергия и ее использование	—
1-2. Электромагнитное поле и электротехника	13
1-3. Задачи курса теоретических основ электротехники	16
1-4. Система единиц	17
<i>Глава вторая. Электрическое поле в диэлектрике</i>	18
2-1. Закон Кулона	—
2-2. Напряженность поля. Смещение	19
2-3. Потенциал. Напряжение	21
2-4. Графическое изображение поля	23
2-5. Образование электрического поля	—
2-6. Поток. Емкость	24
2-7. Обобщение теоремы Гаусса	25
2-8. Проводник и диэлектрик в электрическом поле	28
2-9. Нелинейные диэлектрики	34
<i>Глава третья. Расчет электрических полей</i>	36
3-1. О расчете электрического поля	—
3-2. Метод наложения	—
3-3. Метод расчета по теореме Гаусса	38
3-4. Метод зеркальных изображений	50
3-5. Метод потенциальных коэффициентов	59
3-6. Нелинейные конденсаторы	61
<i>Глава четвертая. Энергия электрического поля и ее преобразования</i>	62
4-1. Энергия системы заряженных тел	—
4-2. Распределение энергии электрического поля	67
4-3. Преобразование энергии электрического поля в системе неподвижных тел. Ток смещения	68
4-4. Взаимные преобразования энергии электрического поля и механической энергии	70
4-5. Силы, действующие в электрическом поле	72
4-6. Емкостная машина постоянного тока	76
<i>Глава пятая. Электрическое поле в проводящей среде</i>	78
5-1. Виды электрического тока	—
5-2. Постоянное электрическое поле в проводящей среде	79
5-3. Электростатическая аналогия	81

Глава шестая. Магнитное поле	85
6-1. Закон Био—Савара—Лапласа	—
6-2. Магнитный потенциал. Магнитное напряжение	86
6-3. Закон полного тока	90
6-4. Магнитный поток. Потокосцепление	—
6-5. Индуктивность и взаимная индуктивность	91
6-6. Магнетик в магнитном поле.	94
6-7. Ферромагнетики	96
Глава седьмая. Расчет магнитных полей	99
7-1. Расчет магнитного поля в пространстве, не занятом токами и постоянными магнитами. Электростатическая аналогия	—
7-2. Эквивалентность контура с током постоянному магниту	102
7-3. Расчет поля по закону Био—Савара—Лапласа или по закону полного тока	104
7-4. Нелинейные тороиды	114
Глава восьмая. Энергия магнитного поля и ее преобразования	115
8-1. Энергия системы контуров с токами.	—
8-2. Распределение энергии магнитного поля	119
8-3. Взаимные преобразования энергии магнитного поля и механической энергии	120
8-4. Силы, действующие в уединенном контуре	121
8-5. Силы, действующие в системе двух контуров	124
8-6. Проводник с током в магнитном поле	126
8-7. Подъемная сила магнита	129
8-8. Закон электромагнитной индукции	130
8-9. Вторая формулировка закона электромагнитной индукции	133
8-10. Индуктивная машина постоянного тока.	136
8-11. Сравнение емкостных и индуктивных машин	139

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Глава девятая. Расчет электрических цепей постоянного тока	141
9-1. Законы электрических цепей	—
9-2. Источники напряжения и тока и их эквивалентность	145
9-3. Теория линии передачи и работа источника на нагрузку	147
9-4. Метод преобразования	150
9-5. Расчет цепей по законам Кирхгофа	154
9-6. Метод наложения	157
9-7. Метод взаимности	159
9-8. Метод эквивалентного источника энергии	160
9-9. Метод контурных токов	162
9-10. Метод узловых напряжений	164
9-11. Нелинейные цепи и их расчет	167
9-12. Емкостные электрические цепи постоянного тока	173
Глава десятая. Расчет магнитных цепей постоянного тока	175
10-1. Законы магнитных цепей	—
10-2. Расчет магнитных цепей	176
10-3. Расчет цепей с постоянным магнитом	180

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ТЕОРИЯ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

<i>Глава одиннадцатая. Синусоидальные напряжения и токи</i>	184
11-1. Периодические переменные токи	—
11-2. Источник синусоидального напряжения	185
11-3. Векторные диаграммы	187
<i>Глава двенадцатая. Простые цепи переменного тока</i>	189
12-1. Особенности цепей переменного тока	—
12-2. Цепь с сопротивлением	190
12-3. Цепь с индуктивностью и цепь с емкостью	192
12-4. Цепь с последовательным соединением сопротивления, индуктивности и емкости	195
12-5. Частные случаи цепи с последовательным соединением сопротивления, индуктивности и емкости	200
12-6. Резонанс напряжений	202
12-7. Цепь с параллельным соединением сопротивления, индуктивности и емкости. Резонанс токов	207
<i>Глава тринадцатая. Элементарные методы расчета простых цепей переменного тока</i>	211
13-1. Эквивалентные схемы	—
13-2. Последовательное соединение приемников	216
13-3. Параллельное соединение приемников	218
13-4. Смешанное соединение приемников	220
<i>Глава четырнадцатая. Символический метод расчета цепей</i>	222
14-1. Символическое изображение синусоидальных функций	—
14-2. Применение символического метода для расчета переменного тока	224
14-3. Расчет цепей переменного тока символическим методом	227
14-4. Метод дуальных цепей	231
<i>Глава пятнадцатая. Основы теории четырехполюсников</i>	233
15-1. Уравнения четырехполюсника	—
15-2. Холостой ход и короткое замыкание четырехполюсника	236
15-3. Определение постоянных четырехполюсника	237
15-4. Повторное сопротивление и коэффициент распространения симметричного четырехполюсника	239
15-5. Цепные схемы и электрические фильтры	240
15-6. Активные четырехполюсники	243
<i>Глава шестнадцатая. Линейные и круговые диаграммы</i>	244
16-1. Векторные уравнения	—
16-2. Действия над кривыми	245
16-3. Обращение кривых	247
16-4. Диаграмма для линии передачи энергии к приемнику	250
16-5. Диаграмма для четырехполюсника	253
16-6. Графическое определение мощности	255
<i>Глава семнадцатая. Цепи с взаимной индукцией</i>	257
17-1. Взаимная индукция при последовательном и параллельном соединении	—
17-2. Расчет сложных цепей с взаимной индукцией	261

17-3. Трансформатор без стального сердечника	262
17-4. Трансформатор и реактивная катушка со стальным сердечником	265
17-5. Резонанс в двух индуктивно связанных цепях	271
Глава восемнадцатая. Трехфазные цепи	273
18-1. Основные понятия	—
18-2. Соединение звездой	276
18-3. Соединение треугольником	281
18-4. Мощность трехфазных систем и ее измерение	284
18-5. Сравнение трехфазных и однофазной систем	286
18-6. Пульсирующее и вращающееся магнитные поля	288
18-7. Основы метода симметричных составляющих	291
Глава девятнадцатая. Периодические несинусоидальные напряжения и токи в линейных цепях	294
19-1. Разложение периодических функций в ряд Фурье	—
19-2. Действующее значение и мощность при несинусоидальных напряжениях и токах	299
19-3. Расчет линейных цепей при несинусоидальных напряжениях и токах	302
19-4. Влияние параметров цепи на форму кривой напряжения или тока	304
19-5. Высшие гармоники в трехфазных цепях	307
Глава двадцатая. Нелинейные цепи переменного тока	309
20-1. Нелинейные элементы при переменном токе	—
20-2. Устройства, основанные на нелинейной зависимости мгновенных значений напряжения и тока	317
20-3. Явления и устройства, основанные на нелинейной зависимости действующих значений напряжения и тока	321
Глава двадцать первая. Переходные процессы и их расчет классическим методом	328
21-1. Общие сведения	—
21-2. Переходные процессы в цепи с последовательным соединением сопротивления и индуктивности	330
21-3. Переходные процессы в цепи с последовательным соединением сопротивления и емкости	336
21-4. Переходные процессы в цепи с последовательным соединением сопротивления, индуктивности и емкости	340
21-5. Переходные процессы в сложных цепях	345
21-6. Переходные процессы в нелинейных цепях	350
21-7. Изображение переходных процессов в фазовой плоскости	356
Глава двадцать вторая. Расчет переходных процессов методами наложения, спектральным и операторным	359
22-1. Метод наложения	—
22-2. Спектральный метод	362
22-3. Операторный метод	367
22-4. О синтезе электрических цепей	378
Глава двадцать третья. Цепи с распределенными параметрами	382
23-1. Сосредоточенные и распределенные параметры цепей	—
23-2. Уравнения однородной линии	383

23-3. Решение уравнений однородной линии для установившихся режимов	384
23-4. Бегущие и стоячие волны	388
23-5. Распределение напряжения и тока вдоль линии	391
23-6. О переходных процессах в однородных линиях	393

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

<i>Глава двадцать четвертая. Уравнения постоянных электрических и магнитных полей</i>	398
24-1. О теории электромагнитного поля	—
24-2. Электромагнитное поле	399
24-3. Электрическое поле в диэлектрической среде	400
24-4. Электрическое поле в проводящей среде	404
24-5. Магнитное поле	406
<i>Глава двадцать пятая. Расчет полей по уравнению Лапласа.</i>	410
25-1. О расчете постоянных электрических и магнитных полей	—
25-2. Теорема единственности решения уравнения Лапласа	411
25-3. Метод разделения переменных.	413
25-4. Расчет полей в цилиндрических координатах методом разделения переменных	414
<i>Глава двадцать шестая. Расчет полей по уравнению Пуассона.</i>	419
26-1. О расчете полей по уравнению Пуассона	—
26-2. Расчет полей в цилиндрических координатах	421
26-3. Магнитное поле двухпроводной линии	427
<i>Глава двадцать седьмая. Расчет полей по уравнениям Максвелла</i>	430
27-1. О расчете полей по уравнениям Максвелла	—
27-2. Расчет полей в прямоугольных координатах	431
27-3. Расчет полей в цилиндрических координатах	433
<i>Глава двадцать восьмая. Специальные методы расчета и моделирование полей</i>	436
28-1. Метод зеркальных изображений	—
28-2. Метод конформных преобразований	441
28-3. Моделирование электрических и магнитных полей	452
<i>Глава двадцать девятая. Постоянное электромагнитное поле</i>	457
29-1. Энергетические процессы в электромагнитном поле	—
29-2. Вектор Пойнтинга	458
<i>Глава тридцатая. Уравнения электромагнитного поля.</i>	461
30-1. Полная система уравнений электромагнитного поля в дифференциальной форме	—
30-2. Теорема Умова—Пойнтинга	464
30-3. Электродинамические потенциалы	466
30-4. Основные уравнения электромагнитного поля в символической форме	470
30-5. Соотношение между токами проводимости и смещения	471

Глава тридцать первая. Излучение электромагнитных волн	472
31-1. Явление излучения. Опыты Герца и Попова.	—
31-2. Электромагнитное поле диполя Герца	474
31-3. Ближняя и дальняя зоны	477
31-4. Мощность и сопротивление излучения	479
Глава тридцать вторая. Распространение электромагнитных волн . . .	481
32-1. Плоская волна в диэлектрической среде	—
32-2. Плоская волна в проводящей среде	485
32-3. Плоская волна в полупроводящей среде	490
Глава тридцать третья. Поверхностный эффект.	492
33-1. Явление поверхностного эффекта	—
33-2. Неравномерное распределение переменного магнитного потока в плоском листе	493
33-3. Неравномерное распределение переменного тока в проводе кругового сечения	495
33-4. Эффект близости для двух параллельных шин	500
Глава тридцать четвертая. Электромагнитное экранирование	501
34-1. О расчете электромагнитных экранов	—
34-2. Тонкостенный цилиндрический экран в однородном поле . . .	503
34-3. Двужильный кабель с металлической оболочкой	507
Глава тридцать пятая. Переходные процессы в электромагнитном поле	513
35-1. О расчете переходных процессов в электромагнитном поле .	—
35-2. Установление магнитного потока в пластине	514
35-3. Установление тока в проводе кругового сечения	517
Приложения	
1. Связь между единицами в системах МКСА, СГС ϵ_0 и СГС μ_0	523
2. Дольные и кратные единицы	—
3. Разложение в ряд Фурье	524
4. Формулы векторного анализа	526
5. Дифференциальные операции векторного анализа	—

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЕЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1-1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Одной из основных задач техники является преобразование природных энергетических запасов в используемые непосредственно виды энергии — в механическую, тепловую, световую и т. п. С этим связана необходимость транспортировки энергетического сырья к месту его использования. В последнее время все шире применяется превращение некоторых видов энергетического сырья (уголь, горючие сланцы и др.) на месте в газ, так как его транспортировка по трубопроводам оказалась весьма рентабельной.

Однако некоторые виды энергии, например энергия рек и морей, энергия горячих источников и пара, энергия



Рис. 1-1.

солнечных лучей, не могут быть ни транспортированы, ни превращены в газ. Энергия топлива и пока еще атомная энергия (если не считать весьма маломощных атомных батарей) непосредственно могут быть преобразованы лишь в тепловую энергию.

Электрическая энергия в отличие от всех других видов энергии легко передается на большие расстояния и легко преобразуется с высоким коэффициентом полезного действия в другие виды энергии. Поэтому в настоящее время общепринятым является преобразование природных энергетических запасов в электрическую энергию с помощью так называемых генераторов и передача посредством проводов к месту потребления, где в приемниках она преобразуется в нужный вид энергии (рис. 1-1).

Схема рис. 1-1 применяется почти во всех электротехнических устройствах, начиная с электропередачи мощностью в миллионы киловатт и кончая дистанционным измерением температуры, при которой термоэлектрический генератор (термопара) с помощью

линии соединена с вольтметром, потребляющим доли ватта. Наличие многих приемников, питающихся от одного генератора, не изменяет принципиальной сущности схемы; в этом случае линия передачи становится разветвленной. В радиотехнических устройствах, где передаются весьма малые мощности, осуществляется беспроводная передача энергии.

Преимущества генерирования, передачи, распределения и преобразования электрической энергии обеспечили электротехнике широкое применение и развитие во всех промышленных странах мира.

Новые производственные отношения, отсутствие частной собственности на запасы энергетического сырья, средства и орудия производства, государственное планирование являются мощным фактором развития электротехники и всеобъемлющего охвата ею всех отраслей нашего народного хозяйства, быта и культуры.

«Коммунизм — это есть советская власть плюс электрификация всей страны» сказал В. И. Ленин в 1921 г. Составленный под его руководством план ГОЭЛРО (Государственный план электрификации России) был выполнен в решающих своих позициях за 10 лет, а в 1958 г. электростанции СССР дали в 26 раз больше электроэнергии, чем намечалось планом ГОЭЛРО, и в 123 раза больше, чем электростанции царской России. Среднее потребление энергии на одного рабочего в промышленности увеличилось за годы советской власти в 20 раз.

Семилетний план на 1959—1965 гг. предусматривает увеличение мощности электростанций и повышение производства электроэнергии больше чем в два раза. Соответственно, очевидно, должна вырасти мощность потребителей — устройств, преобразующих электрическую энергию в другие виды; например, за семилетие должны быть электрифицированы 20 000 километров железных дорог. Электротехника все глубже будет проникать в производство и быт, позволяя механизировать и автоматизировать трудоемкие и сложные процессы, облегчая труд и повышая его производительность.

Рост электроэнергетики сопровождается качественным развитием электротехники. В наше время — время высоких параметров в любой отрасли техники — в электротехнике осуществляется переход ко все более высоким напряжениям (500 кВ), большим мощностям (создаются генераторы на 300 000 кВт), большим скоростям (специальные двигатели имеют 100 000 об/мин); при этом все устройства становятся более экономичными по затрате материалов и по коэффициенту полезного действия.

В последние годы в связи с успехами в развитии науки об атомном ядре электротехника включает в себя также преобразование атомной энергии в электрическую; в нашей стране создаются атомные электростанции на сотни тысяч киловатт.

1-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Под электрической энергией понимают энергию электромагнитного поля, являющегося видом материи. Как и всякая материя, электромагнитное поле обладает энергией и массой. Для электротехники наиболее существенны энергетические процессы, поэтому при расчетах электромагнитного поля ограничиваются рассмотрением его энергии и ее преобразований.

Реально существующее единое электромагнитное поле имеет две составляющие — электрическое поле и магнитное поле, которые

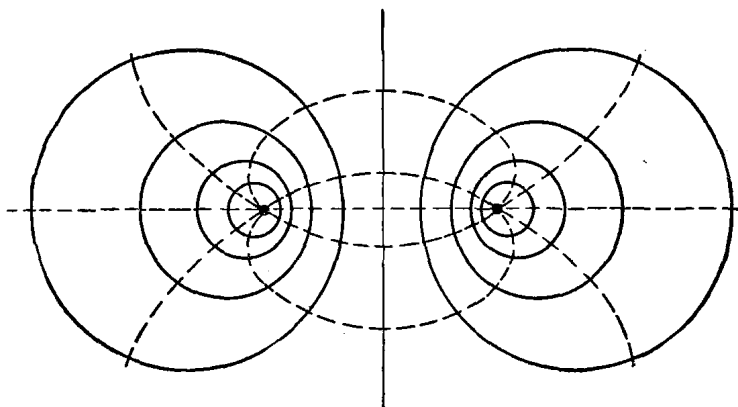


Рис. 1-2.

часто рассматривают раздельно. Такое рассмотрение, сложившееся исторически в то время, когда еще не была известна связь между электрическими и магнитными явлениями, вполне оправдано и теперь, поскольку облегчает изучение свойств этих полей, а следовательно, и электромагнитного поля. Связь между электрическим и магнитным полями можно иллюстрировать на примере линии передачи постоянного тока (рис. 1-2).

При передаче энергии в проводах протекает ток, следовательно, как в проводах, так и вне их создается магнитное поле, изображенное на рис. 1-2 с помощью силовых линий (сплошные линии). Провода линии передачи, изолированные друг от друга и находящиеся под напряжением, создаваемым генератором, электрически заряжены зарядами разного знака. Следовательно, в том же пространстве существует электрическое поле (пунктирные линии на рис. 1-2). На этом рисунке видно характерное различие между электрическим и магнитным полями: силовые линии электрического поля незамкнуты, они начинаются и оканчиваются на заряженных проводах; магнитные силовые линии всегда замкнуты, они не имеют ни начала, ни конца.

Электрическое и магнитное поля связаны между собой, так как изменение напряжения генератора, а следовательно, и электрического поля влечет за собой изменение тока, а следовательно, и магнитного поля.

В ряде случаев одной стороной электромагнитного поля можно пренебречь, так как она незначительна по сравнению с другой. Так, при холостом ходе линии, т. е. при отключенном приемнике, можно пренебречь магнитным полем и учитывать только электрическое поле. Наоборот, при коротком замыкании у приемника необходимо принимать в расчет лишь магнитное поле, электрическим полем можно пренебречь.

Передача, генерирование и потребление электрической энергии, равной произведению напряжения на ток и на время, возможны лишь при наличии электрического и магнитного полей, т. е. при существовании электромагнитного поля; действительно, при холостом ходе и коротком замыкании линии, когда отсутствует одна из составляющих поля, энергия приемнику не передается. В беспроводной передаче движение энергии также связано с существованием электромагнитного поля в пространстве между передающей и приемной антеннами.

В генераторах — электрических машинах, преобразующих механическую энергию вращения в электрическую, используется явление электромагнитной индукции — возникновение электрического напряжения в проводниках, движущихся относительно магнитного поля. Взаимодействие тока нагрузки генератора с магнитным полем создает силы, противодействующие вращению, которые должны быть преодолены первичным двигателем, например турбиной, вращающей генератор; благодаря этому и происходит преобразование механической энергии в электрическую.

Электрические машины обратимы, и электрические двигатели устроены аналогично генераторам, но в двигателях используются силы взаимодействия тока с магнитным полем и происходит преобразование электрической энергии в механическую. Из-за сравнительно низкого напряжения генераторов и двигателей их электрическое поле относительно невелико, и приближенно можно говорить о взаимных преобразованиях энергии магнитного поля и механической энергии.

Основными свойствами электрического поля являются: механическое воздействие на электрические заряды и создание в диэлектрике при изменении электрического поля тока смещения, т. е. магнитного поля.

Электрическое поле в любой среде характеризуется векторами напряженности поля $\mathbf{E}$, смещения $\mathbf{D}$ и диэлектрической проницаемостью среды ϵ . Так как $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, то для полной характеристики поля, кроме ϵ , достаточно только $\mathbf{E}$ или $\mathbf{D}$.

В зависимости от свойства, принятого за исходное, одна из величин, характеризующих поле, является основной, а другая опре-

деляется через нее. Если исходить из механического воздействия на заряд, то из основного соотношения — закона Кулона — определяется напряженность поля $\mathbf{E}$, а смещение находят из выражения $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$. Если исходить из второго свойства поля — создания тока в диэлектрике, то основной величиной будет смещение $\mathbf{D}$, а напряженность поля будет определяться выражением $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{D}}{\epsilon}$.

Основными свойствами магнитного поля являются: механическое воздействие на постоянный магнит и контур с током и создание при любом изменении магнитного поля э. д. с. индукции, т. е. электрического поля. Магнитное поле характеризуется векторами напряженности поля $\mathbf{H}$, индукции $\mathbf{B}$ и магнитной проницаемостью среды μ . Так как $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, то для полной характеристики поля, кроме μ , достаточно только $\mathbf{H}$ или $\mathbf{B}$.

Если исходить из воздействия на постоянный магнит, то основной величиной является напряженность поля $\mathbf{H}$, а индукция $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$. Если исходить из воздействия на контур с током или из создания электрического поля, то основной величиной будет индукция $\mathbf{B}$, а напряженность поля $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$.

В науке об электричестве связь электрических и магнитных явлений была установлена в двадцатых годах прошлого века, когда Ампер и Эрстед доказали, что электрический ток сопровождается магнитным полем; окончательно связь электрического и магнитного поля была подтверждена Фарадеем, открывшим явление электромагнитной индукции (1831 г.)

Развитие науки служило основой для развития техники и, наоборот, развивающаяся техника вызывала необходимость новых исследований. Открытие закона электромагнитной индукции явилось мощным толчком к созданию электрических машин в сороковых годах прошлого века.

Электротехника, зародившаяся в тридцатых годах 19 века, вначале развивалась лишь как техника постоянного тока. Только после создания М. О. Доливо-Добровольским системы трехфазного тока и трехфазного двигателя (1891 г.) переменный ток стал вытеснять постоянный. Передача электрической энергии стала осуществляться также трехфазным током.

Теория электромагнитного поля в законченной математической форме была создана Максвеллом в 1873 г. Подтвержденная многочисленными опытами ряда ученых она была окончательно принята в начале нашего века.

Введенное Максвеллом представление об электромагнитных волнах, экспериментально подтвержденное работами Герца, позволило А. С. Попову в 1895 г. осуществить передачу сигнала без проводов, что послужило началом новой области электротехники — радиотехники.

С начала нашего века появляются и быстро совершенствуются различные электронно-ионные и полупроводниковые приборы и аппараты, являющиеся нелинейными (не подчиняющимися закону Ома) элементами электротехнических устройств. Применение нелинейных элементов позволило решить такие задачи, как прямое и обратное преобразование переменного тока в постоянный, усиление напряжения и мощности и т. д., а перед теорией выдвинуло требование создания специальных методов расчета нелинейных устройств.

1-3. ЗАДАЧИ КУРСА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Осуществление грандиозных планов дальнейшей электрификации нашей страны, эксплуатация существующих и создание новых электротехнических устройств требуют от инженера-электрика глубокого понимания физических процессов и умения производить их технический расчет. Фундаментом электротехнического образования является курс теоретических основ электротехники (ТОЭ), базирующийся на знаниях, полученных в курсах физики, математики и механики. Задачами курса ТОЭ являются изучение электромагнитных явлений и процессов преобразования электрической энергии и методов их расчета.

Часть этих задач может быть решена с помощью таких интегральных величин, как ток, напряжение, поток и др., когда знание поля в каждой точке пространства не является необходимым; решением таких задач занимается теория электрических и магнитных цепей.

Другие задачи требуют расчета поля в каждой точке пространства; такими задачами применительно к линии передачи (рис. 1-1) являются: определение характеристик линии — ее индуктивности и емкости; расчет влияния линии на другие линии, например близко расположенные линии связи; расчет движения энергии, например движения ее вдоль проводов линии и излучения энергии в окружающее пространство. Подобные задачи решаются методами теории электромагнитного поля.

Таким образом, курс ТОЭ должен содержать: основные законы и соотношения, известные из курса физики, но представленные в более общей и удобной для расчетов форме, методы расчета постоянных электрических и магнитных полей, расчет преобразований энергии, методы расчета электрических и магнитных цепей постоянного и переменного токов, теорию и расчет переменного электромагнитного поля.

При раздельном рассмотрении электрических и магнитных полей, несмотря на различный их характер, уравнения, связывающие различные величины в этих полях, могут быть приведены к аналогичному виду. Поэтому расчеты электрических и магнитных полей и цепей формально аналогичны друг другу. При этом приведение