

Л. А. Бессонов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Издание девятое
переработанное и дополненное

Рекомендовано Государственным комитетом
Российской Федерации по высшему
образованию
в качестве учебника для студентов
вузов, обучающихся по направлениям:
"Электротехника, электромеханика,
электротехнологии", "Электроэнергетика"
и "Приборостроение"



Москва
«Высшая школа» 1996

Предисловие	3
Введение	6
Часть I. Линейные электрические цепи	8
Глава первая. Основные положения теории электромагнитного поля и их применение к теории электрических цепей	8
§ 1.1. Электромагнитное поле как вид материи	8
§ 1.2. Интегральные и дифференциальные соотношения между основными величинами, характеризующими поле	9
§ 1.3. Подразделение электротехнических задач на цепные и полевые	17
§ 1.4. Конденсатор	19
§ 1.5. Индуктивность. Явление самоиндукции	21
§ 1.6. Взаимная индуктивность. Явление взаимной индукции	23
§ 1.7. Схемы замещения реальных электротехнических устройств	25
<i>Вопросы для самопроверки</i>	<i>27</i>
Глава вторая. Свойства линейных электрических цепей и методы их расчета. Электрические цепи постоянного тока	28
§ 2.1. Определение линейных и нелинейных электрических цепей	28
§ 2.2. Источник ЭДС и источник тока	29
§ 2.3. Неразветвленные и разветвленные электрические цепи	31
§ 2.4. Напряжение на участке цепи	32
§ 2.5. Закон Ома для участка цепи, не содержащего источника ЭДС ..	33
§ 2.6. Закон Ома для участка цепи, содержащего источник ЭДС. Обобщенный закон Ома	33
§ 2.7. Законы Кирхгофа	34
§ 2.8. Составление уравнений для расчета токов в схемах с помощью законов Кирхгофа	35
§ 2.9. Заземление одной точки схемы	37
§ 2.10. Потенциальная диаграмма	38
§ 2.11. Энергетический баланс в электрических цепях	39
§ 2.12. Метод пропорциональных величин	39
§ 2.13. Метод контурных токов	40
§ 2.14. Принцип наложения и метод наложения	44
§ 2.15. Входные и взаимные проводимости ветвей. Входное сопротивление	45
§ 2.16. Теорема взаимности	47
§ 2.17. Теорема компенсации	49
§ 2.18. Линейные соотношения в электрических цепях	50
§ 2.19. Изменения токов ветвей, вызванные приращением сопротивления одной ветви (теорема вариаций)	52
§ 2.20. Замена нескольких параллельных ветвей, содержащих источники ЭДС и источники тока, одной эквивалентной	53
§ 2.21. Метод двух узлов	55
§ 2.22. Метод узловых потенциалов	56
§ 2.23. Преобразование звезды в треугольник и треугольника в звезду	60

	§ 2.24. Перенос источников ЭДС и источников тока	63
	§ 2.25. Активный и пассивный двухполюсники	64
	§ 2.26. Метод эквивалентного генератора	64
	§ 2.27. Передача энергии от активного двухполюсника нагрузке	67
	§ 2.28. Передача энергии по линии передач	68
	§ 2.29. Некоторые выводы по методам расчета электрических цепей	70
	§ 2.30. Основные свойства матриц и простейшие операции с ними	70
	§ 2.31. Некоторые топологические понятия и топологические матрицы	71
	§ 2.32. Запись уравнений по законам Кирхгофа с помощью топологических матриц	74
	§ 2.33. Обобщенная ветвь электрической цепи	75
	§ 2.34. Вывод уравнений метода контурных токов с помощью топологических матриц	75
	§ 2.35. Вывод уравнений метода узловых потенциалов с помощью топологических матриц	77
	§ 2.36. Соотношения между топологическими матрицами	77
	§ 2.37. Сопоставление матрично-топологического и традиционного направлений теории цепей	79
	<i>Вопросы для самопроверки</i>	80
	Глава третья. Электрические цепи однофазного синусоидального тока	81
	§ 3.1. Синусоидальный ток и основные характеризующие его величины	81
	§ 3.2. Среднее и действующее значения синусоидально изменяющейся величины	82
	§ 3.3. Коэффициент амплитуды и коэффициент формы	83
	§ 3.4. Изображение синусоидально изменяющихся величин векторами на комплексной плоскости. Комплексная амплитуда. Комплекс действующего значения	83
	§ 3.5. Сложение и вычитание синусоидальных функций времени на комплексной плоскости. Векторная диаграмма	85
	§ 3.6. Мгновенная мощность	86
	§ 3.7. Резистивный элемент в цепи синусоидального тока	86
	§ 3.8. Индуктивный элемент в цепи синусоидального тока	87
	§ 3.9. Емкостный элемент в цепи синусоидального тока	89
	§ 3.10. Умножение вектора на j и $-j$	90
	§ 3.11. Основы символического метода расчета цепей синусоидального тока	91
	§ 3.12. Комплексное сопротивление. Закон Ома для цепи синусоидального тока	92
	§ 3.13. Комплексная проводимость	93
	§ 3.14. Треугольник сопротивлений и треугольник проводимостей	93
	§ 3.15. Работа с комплексными числами	94
	§ 3.16. Законы Кирхгофа в символической форме записи	95
	§ 3.17. Применение к расчету цепей синусоидального тока методов, рассмотренных в главе «Электрические цепи постоянного тока»	96
	§ 3.18. Применение векторных диаграмм при расчете электрических цепей синусоидального тока	97
	§ 3.19. Изображение разности потенциалов на комплексной плоскости	100
	§ 3.20. Топографическая диаграмма	100
	§ 3.21. Активная, реактивная и полная мощности	103
	§ 3.22. Выражение мощности в комплексной форме записи	104
	§ 3.23. Измерение мощности ваттметром	105
	§ 3.24. Двухполюсник в цепи синусоидального тока	106
	§ 3.25. Резонансный режим работы двухполюсника	108
	§ 3.26. Резонанс токов	108
	§ 3.27. Компенсация сдвига фаз	110
	§ 3.28. Резонанс напряжений	110

§ 3.29. Исследование работы схемы рис. 3.26, а при изменении частоты и индуктивности	112
§ 3.30. Частотные характеристики двухполюсников	113
§ 3.31. Канонические схемы. Эквивалентные двухполюсники	116
§ 3.32. Передача энергии от активного двухполюсника нагрузке	117
§ 3.33. Согласующий трансформатор	117
§ 3.34. Идеальный трансформатор	118
§ 3.35. Падение и потеря напряжения в линии передачи энергии	119
§ 3.36. Расчет электрических цепей при наличии в них магнитно-связанных катушек	119
§ 3.37. Последовательное соединение двух магнитно-связанных катушек	121
§ 3.38. Определение взаимной индуктивности опытным путем	122
§ 3.39. Трансформатор. Вносимое сопротивление	122
§ 3.40. Резонанс в магнитно-связанных колебательных контурах	125
§ 3.41. «Развязывание» магнитно-связанных цепей	127
§ 3.42. Теорема о балансе активных и реактивных мощностей (теорема Лонжевена)	128
§ 3.43. Теорема Теллегена	130
§ 3.44. Определение дуальной цепи	130
§ 3.45. Преобразование исходной схемы в дуальную	132
<i>Вопросы для самопроверки</i>	133
Глава четвертая. Четырехполюсники. Цепи с управляемыми источниками. Круговые диаграммы	135
§ 4.1. Определение четырехполюсника	135
§ 4.2. Шесть форм записи уравнений четырехполюсника	136
§ 4.3. Вывод уравнений в А-форме	137
§ 4.4. Определение коэффициентов А-формы записи уравнений четырехполюсника	139
§ 4.5. Т- и П-схемы замещения пассивного четырехполюсника	141
§ 4.6. Определение коэффициентов Y-, Z-, G- и H-форм записи уравнений четырехполюсника	142
§ 4.7. Определение коэффициентов одной формы уравнений через коэффициенты другой формы	142
§ 4.8. Применение различных форм записи уравнений четырехполюсника. Соединения четырехполюсников. Условия регулярности	144
§ 4.9. Характеристические и повторные сопротивления четырехполюсников	146
§ 4.10. Постоянная передача и единицы измерения затухания	147
§ 4.11. Уравнения четырехполюсника, записанные через гиперболические функции	148
§ 4.12. Конвертор и инвертор сопротивления	148
§ 4.13. Гиратор	149
§ 4.14. Операционный усилитель	150
§ 4.15. Управляемые источники напряжения (тока)	153
§ 4.16. Активный четырехполюсник	155
§ 4.17. Многополюсник	157
§ 4.18. Построение дуги окружности по хорде и вписанному углу	159
§ 4.19. Уравнение дуги окружности в векторной форме записи	159
§ 4.20. Круговые диаграммы	160
§ 4.21. Круговая диаграмма тока двух последовательно соединенных сопротивлений	161
§ 4.22. Круговая диаграмма напряжения двух последовательно соединенных сопротивлений	162
§ 4.23. Круговая диаграмма тока активного двухполюсника	163
§ 4.24. Круговая диаграмма напряжения четырехполюсника	164
§ 4.25. Линейные диаграммы	166
<i>Вопросы для самопроверки</i>	166

Глава пятая. Электрические фильтры	167
§ 5.1. Назначение и типы фильтров	167
§ 5.2. Основы теории k -фильтров	168
§ 5.3. K -фильтры НЧ и ВЧ, полосно-пропускающие и полосно-заграждающие k -фильтры	171
§ 5.4. Качественное определение k -фильтра	175
§ 5.5. Основы теории m -фильтров. Каскадное включение фильтров ...	176
§ 5.6. RC -фильтры	180
§ 5.7. Активные RC -фильтры	180
§ 5.8. Передаточные функции активных RC -фильтров в нормированном виде	182
§ 5.9. Получение передаточной функции низкочастотного активного RC -фильтра, выбор схемы и определение ее параметров	183
§ 5.10. Получение передаточной функции полосно-пропускающего активного RC -фильтра	183
Вопросы для самопроверки	184
Глава шестая. Трехфазные цепи	184
§ 6.1. Трехфазная система ЭДС	184
§ 6.2. Принцип работы трехфазного машинного генератора	185
§ 6.3. Трехфазная цепь. Расширение понятия фазы	185
§ 6.4. Основные схемы соединения трехфазных цепей, определение линейных и фазовых величин	186
§ 6.5. Соотношения между линейными и фазовыми напряжениями и токами	188
§ 6.6. Преимущества трехфазных систем	189
§ 6.7. Расчет трехфазных цепей	189
§ 6.8. Соединение звезда — звезда с нулевым проводом	189
§ 6.9. Соединение нагрузки треугольником	190
§ 6.10. Оператор a трехфазной системы	191
§ 6.11. Соединение звезда — звезда без нулевого провода	191
§ 6.12. Трехфазные цепи при наличии взаимной индукции	192
§ 6.13. Активная, реактивная и полная мощности трехфазной системы	193
§ 6.14. Измерение активной мощности в трехфазной системе	194
§ 6.15. Круговые и линейные диаграммы в трехфазных цепях	195
§ 6.16. Указатель последовательности чередования фаз	196
§ 6.17. Магнитное поле катушки с синусоидальным током	197
§ 6.18. Получение кругового вращающегося магнитного поля	197
§ 6.19. Принцип работы асинхронного двигателя	199
§ 6.20. Разложение несимметричной системы на системы прямой, обратной и нулевой последовательностей фаз	200
§ 6.21. Основные положения метода симметричных составляющих ...	201
Вопросы для самопроверки	204
Глава седьмая. Периодические несинусоидальные токи в линейных электрических цепях	204
§ 7.1. Определение периодических несинусоидальных токов и напряжений	204
§ 7.2. Изображение несинусоидальных токов и напряжений с помощью рядов Фурье	205
§ 7.3. Некоторые свойства периодических кривых, обладающих симметрией	206
§ 7.4. О разложении в ряд Фурье кривых геометрически правильной и неправильной форм	207
§ 7.5. Графический (графоаналитический) метод определения гармоник ряда Фурье	207
§ 7.6. Расчет токов и напряжений при несинусоидальных источниках питания	210

§ 7.7. Резонансные явления при несинусоидальных токах	212
§ 7.8. Действующие значения несинусоидального тока и несинусоидального напряжения	213
§ 7.9. Среднее по модулю значение несинусоидальной функции	214
§ 7.10. Величины, которые измеряют амперметры и вольтметры при несинусоидальных токах	214
§ 7.11. Активная и полная мощности несинусоидального тока	215
§ 7.12. Замена несинусоидальных токов и напряжений эквивалентными синусоидальными	216
§ 7.13 ¹ . Особенности работы трехфазных систем, вызываемых гармониками, кратными трем	216
§ 7.14. Биения	221
§ 7.15. Модулированные колебания	221
§ 7.16. Расчет линейных цепей при воздействии модулированных колебаний	225
<i>Вопросы для самопроверки</i>	225
Глава восьмая. Переходные процессы в линейных электрических цепях	226
§ 8.1. Определение переходных процессов	226
§ 8.2. Приведение задачи о переходном процессе к решению линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами	227
§ 8.3. Принужденные и свободные составляющие токов и напряжений	228
§ 8.4. Обоснование невозможности скачка тока через индуктивную катушку и скачка напряжения на конденсаторе	230
§ 8.5. Первый закон (правило) коммутации	231
§ 8.6. Второй закон (правило) коммутации	231
§ 8.7. Начальные значения величин	231
§ 8.8. Независимые и зависимые (послекоммутационные) начальные значения	232
§ 8.9. Нулевые и ненулевые начальные условия	232
§ 8.10. Составление уравнений для свободных токов и напряжений	232
§ 8.11. Алгебраизация системы уравнений для свободных токов	233
§ 8.12. Составление характеристического уравнения системы	234
§ 8.13. Составление характеристического уравнения путем использования выражения для входного сопротивления цепи на переменном токе	236
§ 8.14. Основные и неосновные зависимые начальные значения	238
§ 8.15. Определение степени характеристического уравнения	239
§ 8.16. Свойства корней характеристического уравнения	240
§ 8.17. Отрицательные знаки действительных частей корней характеристических уравнений	241
§ 8.18. Характер свободного процесса при одном корне	242
§ 8.19. Характер свободного процесса при двух действительных неравных корнях	242
§ 8.20. Характер свободного процесса при двух равных корнях	243
§ 8.21. Характер свободного процесса при двух комплексно-сопряженных корнях	243
§ 8.22. Некоторые особенности переходных процессов	244
§ 8.23. Переходные процессы, сопровождающиеся электрической искрой (дугой)	245
§ 8.24. Опасные перенапряжения, вызываемые размыканием ветвей в цепях, содержащих индуктивные катушки	245
§ 8.25. Общая характеристика методов анализа переходных процессов в линейных электрических цепях	246
§ 8.26. Определение классического метода расчета переходных процессов	247
§ 8.27. Определение постоянных интегрирования в классическом методе	247

	§ 8.28. О переходных процессах, при макроскопическом рассмотрении которых не выполняются законы коммутации . Обобщенные законы коммутации	258
	§ 8.29. Логарифм как изображение числа	261
	§ 8.30. Комплексные изображения синусоидальных функций	261
	§ 8.31. Введение в операторный метод	261
	§ 8.32. Преобразование Лапласа	262
	§ 8.33. Изображение постоянной	262
	§ 8.34. Изображение показательной функции e^{at}	263
	§ 8.35. Изображение первой производной	263
	§ 8.36. Изображение напряжения на индуктивном элементе	264
	§ 8.37. Изображение второй производной	264
	§ 8.38. Изображение интеграла	265
	§ 8.39. Изображение напряжения на конденсаторе	265
	§ 8.40. Некоторые теоремы и предельные соотношения	267
а	§ 8.41. Закон Ома в операторной форме. Внутренние ЭДС	269
	§ 8.42. Первый закон Кирхгофа в операторной форме	271
	§ 8.43. Второй закон Кирхгофа в операторной форме	272
а	§ 8.44. Составление уравнений для изображений путем использования методов, рассмотренных в третьей главе	273
	§ 8.45. Последовательность расчета операторным методом	273
	§ 8.46. Изображение функции времени в виде отношения $N(p)/M(p)$ двух полиномов по степеням p	275
а	§ 8.47. Переход от изображения к функции времени	276
	§ 8.48. Разложение сложной дроби на простые	277
	§ 8.49. Формула разложения	278
	§ 8.50. Дополнения к операторному методу	282
	§ 8.51. Переходная проводимость	283
	§ 8.52. Понятие о переходной функции	285
	§ 8.53. Интеграл Дюамеля	287
	§ 8.54. Последовательность расчета с помощью интеграла Дюамеля	288
	§ 8.55. Применение интеграла Дюамеля при сложной форме напряжения	289
	§ 8.56. Сравнение различных методов расчета переходных процессов	291
	§ 8.57. Дифференцирование электрическим путем	291
	§ 8.58. Интегрирование электрическим путем	292
а	§ 8.59. Передаточная функция четырехполюсника на комплексной частоте	293
а	§ 8.60. Переходные процессы при воздействии импульсов напряжения	294
а	§ 8.61. Дельта-функция, единичная функция и их свойства. Импульсная переходная проводимость	296
а	§ 8.62. Определение $h(t)$ и $h^{\delta}(t)$ через $K(p)$	299
а	§ 8.63. Метод пространства состояний	299
а	§ 8.64. Дополняющие двухполюсники	305
а	§ 8.65. Системные функции и понятие о видах чувствительности	305
а	§ 8.66. Обобщенные функции и их применение к расчету переходных процессов	306
а	§ 8.67. Интеграл Дюамеля для огибающей	307
	<i>Вопросы для самопроверки</i>	308
	Глава девятая. Интеграл Фурье. Спектральный метод. Сигналы	310
а	§ 9.1. Ряд Фурье в комплексной форме записи	310
	§ 9.2. Спектр функции и интеграл Фурье	312
	§ 9.3. Спектр функции, смещенной во времени. Спектр суммы функций времени	316
	§ 9.4. Теорема Рейли	316
	§ 9.5. Применение спектрального метода	317

§ 9.6. Текущий спектр функции времени	322
§ 9.7. Основные сведения по теории сигналов	322
§ 9.8. Узкополосный и аналитический сигналы	324
§ 9.9. Частотный спектр аналитического сигнала	325
§ 9.10. Прямое и обратное преобразование Гильберта	326
<i>Вопросы для самопроверки</i>	326
Глава десятая. Синтез электрических цепей	327
§ 10.1. Характеристика синтеза	327
§ 10.2. Условия, которым должны удовлетворять входные сопротивления двухполюсников	328
§ 10.3. Реализация двухполюсников лестничной (цепной) схемой	330
§ 10.4. Реализация двухполюсников путем последовательного выделения простейших составляющих	334
§ 10.5. Метод Бруне	338
§ 10.6. Понятие о минимально-фазовом и неминимально-фазовом четырехполюсниках	341
§ 10.7. Синтез четырехполюсников Г-образными и RC-схемами	342
§ 10.8. Четырехполюсник для фазовой коррекции	343
§ 10.9. Четырехполюсник для амплитудной коррекции	345
§ 10.10. Аппроксимация частотных характеристик	346
<i>Вопросы для самопроверки</i>	349
Глава одиннадцатая. Установившиеся процессы в электрических и магнитных цепях, содержащих линии с распределенными параметрами ...	350
§ 11.1. Основные определения	350
§ 11.2. Составление дифференциальных уравнений для однородной линии с распределенными параметрами	353
§ 11.3. Решение уравнений линии с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном процессе	354
§ 11.4. Постоянная распространения и волновое сопротивление	356
§ 11.5. Формулы для определения комплексов напряжения и тока в любой точке линии через комплексы напряжения и тока в начале линии .	357
§ 11.6. Графическая интерпретация гиперболических синуса и косинуса от комплексного аргумента	358
§ 11.7. Формулы для определения напряжения и тока в любой точке линии через комплексы напряжения и тока в конце линии	358
§ 11.8. Падающие и отраженные волны в линии	359
§ 11.9. Коэффициент отражения	361
§ 11.10. Фазовая скорость	361
§ 11.11. Длина волны	362
§ 11.12. Линия без искажений	362
§ 11.13. Согласованная нагрузка	363
§ 11.14. Определение напряжения и тока при согласованной нагрузке	364
§ 11.15. Коэффициент полезного действия линии передачи при согласованной нагрузке	364
§ 11.16. Входное сопротивление нагруженной линии	365
§ 11.17. Определение напряжения и тока в линии без потерь	365
§ 11.18. Входное сопротивление линии без потерь при холостом ходе ..	366
§ 11.19. Входное сопротивление линии без потерь при коротком замыкании на конце линии	367
§ 11.20. Входное сопротивление линии без потерь при реактивной нагрузке	367
§ 11.21. Определение стоячих электромагнитных волн	368
§ 11.22. Стоячие волны в линии без потерь при холостом ходе линии ..	369
§ 11.23. Стоячие волны в линии без потерь при коротком замыкании на конце линии	369

	§ 11.24. Четвертьволновый трансформатор	370
	§ 11.25. Бегущие, стоячие и смешанные волны в линиях без потерь. Коэффициенты бегущей и стоячей волн	370
	§ 11.26. Аналогия между уравнениями линии с распределенными параметрами и уравнениями четырехполюсника	371
	§ 11.27. Замена четырехполюсника эквивалентной ему линией с распределенными параметрами и обратная замена	372
	§ 11.28. Четырехполюсник заданного затухания	374
	§ 11.29. Цепная схема	375
	<i>Вопросы для самопроверки</i>	379
	Глава двенадцатая. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих линии с распределенными параметрами	379
	§ 12.1. Общие сведения	379
	§ 12.2. Исходные уравнения и их решение	380
	§ 12.3. Падающие и отраженные волны на линиях	382
	§ 12.4. Связь между функциями f_1 , f_2 и функциями φ_1 , φ_2	382
	§ 12.5. Электромагнитные процессы при движении прямоугольной волны по линии	384
	§ 12.6. Схема замещения для исследования волновых процессов в линиях с распределенными параметрами	385
	§ 12.7. Подключение разомкнутой на конце линии к источнику постоянного напряжения	386
	§ 12.8. Переходный процесс при подключении источника постоянного напряжения к двум последовательно соединенным линиям при наличии емкости в месте стыка линий	389
	§ 12.9. Линия задержки	392
	§ 12.10. Использование линий для формирования кратковременных импульсов	393
	§ 12.11. Исходные положения по применению операторного метода к расчету переходных процессов в линиях	394
	§ 12.12. Подключение линии без потерь конечной длины l , разомкнутой на конце, к источнику постоянного напряжения	397
	§ 12.13. Подключение линии без искажения конечной длины l , разомкнутой на конце, к источнику постоянного напряжения U	397
	§ 12.14. Подключение бесконечно протяженного кабеля без индуктивности и утечки к источнику постоянного напряжения U	398
	§ 12.15. Подключение бесконечно протяженной линии без утечки к источнику постоянного напряжения	399
	<i>Вопросы для самопроверки</i>	400
	Литература к I части	402
	Часть II. Нелинейные электрические цепи	404
	Глава тринадцатая. Нелинейные электрические цепи постоянного тока	404
	§ 13.1. Основные определения	404
	§ 13.2. ВАХ нелинейных резисторов	404
	§ 13.3. Общая характеристика методов расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока	407
	§ 13.4. Последовательное соединение НР	407
	§ 13.5. Параллельное соединение НР	409
	§ 13.6. Последовательно-параллельное соединение сопротивлений	409
	§ 13.7. Расчет разветвленной нелинейной цепи методом двух узлов	410
	§ 13.8. Замена нескольких параллельных ветвей, содержащих НР и ЭДС, одной эквивалентной	412
	§ 13.9. Расчет нелинейных цепей методом эквивалентного генератора	412

§ 13.10. Статическое и дифференциальное сопротивление	414
§ 13.11. Замена нелинейного резистора эквивалентным линейным сопротивлением и ЭДС	415
§ 13.12. Стабилизатор тока	416
§ 13.13. Стабилизатор напряжения	416
§ 13.14. Построение ВАХ участков цепей, содержащих узлы с подтекающими извне токами	418
§ 13.15. Диакоптика нелинейных цепей	419
§ 13.16. Терморезисторы	420
§ 13.17. Фоторезистор и фотодиод	420
§ 13.18. Передача максимальной мощности линейной нагрузке от источника с нелинейным внутренним сопротивлением	421
§ 13.19. Магниторезисторы и магнитодиоды	422
<i>Вопросы для самопроверки</i>	422
Глава четырнадцатая. Магнитные цепи	423
§ 14.1. Подразделение веществ на сильномагнитные и слабомагнитные	423
§ 14.2. Основные величины, характеризующие магнитное поле	423
§ 14.3. Основные характеристики ферромагнитных материалов	425
§ 14.4. Потери, обусловленные гистерезисом	426
§ 14.5. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы	428
§ 14.6. Магнитодиэлектрики и ферриты	428
§ 14.7. Закон полного тока	429
§ 14.8. Магнитодвижущая (намагничивающая) сила	429
§ 14.9. Разновидности магнитных цепей	430
§ 14.10. Роль ферромагнитных материалов в магнитной цепи	430
§ 14.11. Падение магнитного напряжения	431
§ 14.12. Вебер-амперные характеристики	432
§ 14.13. Построение вебер-амперных характеристик	432
§ 14.14. Законы Кирхгофа для магнитных цепей	434
§ 14.15. Применение к магнитным цепям всех методов, используемых для расчета электрических цепей с нелинейными резисторами	436
§ 14.16. Определение МДС неразветвленной магнитной цепи по заданному току	436
§ 14.17. Определение потока в неразветвленной магнитной цепи по заданной МДС	438
§ 14.18. Расчет разветвленной магнитной цепи методом двух узлов	438
§ 14.19. Дополнительные замечания к расчету магнитных цепей	441
§ 14.20. Получение постоянного магнита	442
§ 14.21. Расчет магнитной цепи постоянного магнита	442
§ 14.22. Прямая и коэффициент возврата	444
§ 14.23. Магнитное сопротивление и магнитная проводимость участка магнитной цепи. Закон Ома для магнитной цепи	444
§ 14.24. Магнитная линия с распределенными параметрами	446
§ 14.25. Пояснения к формуле $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J})$	448
<i>Вопросы для самопроверки</i>	449
Глава пятнадцатая. Нелинейные электрические цепи переменного тока	449
§ 15.1. Подразделение нелинейных элементов	449
§ 15.2. Общая характеристика нелинейных резисторов	450
§ 15.3. Общая характеристика нелинейных индуктивных элементов	451
§ 15.4. Потери в сердечниках нелинейных индуктивных катушек, обусловленные вихревыми токами	452
§ 15.5. Потери в ферромагнитном сердечнике, обусловленные гистерезисом	452
§ 15.6. Схема замещения нелинейной индуктивной катушки	453

	§ 15.7. Общая характеристика нелинейных емкостных элементов	454
	§ 15.8. Нелинейные элементы как генераторы высших гармоник тока и напряжения	455
	§ 15.9. Основные преобразования, осуществляемые с помощью нелинейных электрических цепей	456
	§ 15.10. Некоторые физические явления, наблюдаемые в нелинейных цепях	458
	§ 15.11. Разделение нелинейных элементов по степени симметрии характеристик относительно осей координат	459
	§ 15.12. Аппроксимация характеристик нелинейных элементов	460
	§ 15.13. Аппроксимация симметричных характеристик для мгновенных значений гиперболическим синусом	460
	§ 15.14. Понятие о функциях Бесселя	462
77	§ 15.15. Разложение гиперболических синуса и косинуса от периодического аргумента в ряды Фурье	463
62	§ 15.16. Разложение гиперболического синуса от постоянной и синусоидально меняющейся составляющих в ряд Фурье	464
30	§ 15.17. Некоторые общие свойства симметричных нелинейных элементов	464
10	§ 15.18. Появление постоянной составляющей тока (напряжения, потока, заряда) на нелинейном элементе с симметричной характеристикой	466
80	§ 15.19. Типы характеристик нелинейных элементов	466
10	§ 15.20. Характеристики для мгновенных значений	466
	§ 15.21. ВАХ по первым гармоникам	466
	§ 15.22. ВАХ для действующих значений	468
	§ 15.23. Получение аналитическим путем обобщенных характеристик управляемых нелинейных элементов по первым гармоникам	469
	§ 15.24. Простейшая управляемая нелинейная индуктивная катушка	470
	§ 15.25. ВАХ управляемой нелинейной индуктивной катушки по первым гармоникам	473
	§ 15.26. ВАХ управляемого нелинейного конденсатора по первым гармоникам	475
	§ 15.27. Основные сведения об устройстве биполярного транзистора	476
	§ 15.28. Основные способы включения биполярных транзисторов в схему	477
88	§ 15.29. Принцип работы биполярного транзистора	477
88	§ 15.30. ВАХ биполярного транзистора	479
14	§ 15.31. Биполярный транзистор в качестве усилителя тока, напряжения, мощности	480
24	§ 15.32. Связь между приращениями входных и выходных величин биполярного транзистора	481
41	§ 15.33. Схема замещения биполярного транзистора для малых приращений. Методика расчета схем с управляемыми источниками с учетом их частотных свойств	482
11	§ 15.34. Графический расчет схем на транзисторах	484
01	§ 15.35. Принцип работы полевого транзистора	486
83	§ 15.36. ВАХ полевого транзистора	486
01	§ 15.37. Схемы включения полевого транзистора	486
	§ 15.38. Основные сведения о трехэлектродной лампе	487
	§ 15.39. ВАХ трехэлектродной лампы для мгновенных значений	488
04	§ 15.40. Аналитическое выражение сеточной характеристики электронной лампы	489
01	§ 15.41. Связь между малыми приращениями входных и выходных величин электронной лампы	489
02	§ 15.42. Схема замещения электронной лампы для малых приращений	490
12	§ 15.43. Тиристор — управляемый полупроводниковый диод	491
	§ 15.44. Общая характеристика методов анализа и расчета нелинейных электрических цепей переменного тока	492

§ 15.45. Графический метод расчета при использовании характеристик нелинейных элементов для мгновенных значений	493
§ 15.46. Аналитический метод расчета при использовании характеристик нелинейных элементов для мгновенных значений при их кусочно-линейной аппроксимации	494
§ 15.47. Аналитический (графический) метод расчета по первым гармоникам токов и напряжений	495
§ 15.48. Анализ нелинейных цепей переменного тока путем использования ВАХ для действующих значений	496
§ 15.49. Аналитический метод расчета цепей по первой и одной или нескольким высшим или низшим гармоникам	497
§ 15.50. Расчет цепей с помощью линейных схем замещения	497
§ 15.51. Расчет цепей, содержащих индуктивные катушки, сердечники которых имеют почти прямоугольную кривую намагничивания	498
§ 15.52. Расчет цепей, содержащих нелинейные конденсаторы с прямоугольной кулон-вольтной характеристикой	500
§ 15.53. Выпрямление переменного напряжения	500
§ 15.54. Автоколебания	503
§ 15.55. Мягкое и жесткое возбуждение автоколебаний	504
§ 15.56. Определение феррорезонансных цепей	505
§ 15.57. Построение ВАХ последовательной феррорезонансной цепи ..	506
§ 15.58. Триггерный эффект в последовательной феррорезонансной цепи. Феррорезонанс напряжений	506
§ 15.59. ВАХ параллельного соединения конденсатора и катушки со стальным сердечником. Феррорезонанс токов	508
§ 15.60. Триггерный эффект в параллельной феррорезонансной цепи ..	508
§ 15.61. Частотные характеристики нелинейных цепей	509
§ 15.62. Применение символического метода для расчета нелинейных цепей. Построение векторных и топографических диаграмм	510
§ 15.63. Метод эквивалентного генератора	512
§ 15.64. Векторная диаграмма нелинейной индуктивной катушки	513
§ 15.65. Определение намагничивающего тока	515
§ 15.66. Определение тока потерь	516
§ 15.67. Основные соотношения для трансформатора со стальным сердечником	517
§ 15.68. Векторная диаграмма трансформатора со стальным сердечником	521
§ 15.69. Субгармонические колебания. Многообразие типов движений в нелинейных цепях	522
§ 15.70. Автомодуляция. Хаотические колебания (странные аттракторы)	524
<i>Вопросы для самопроверки</i>	527
Г л а в а ш е с т н а д ц а т а я. Переходные процессы в нелинейных электрических цепях	
§ 16.1. Общая характеристика методов анализа и расчета переходных процессов	528
§ 16.2. Расчет, основанный на графическом подсчете определенного интеграла	529
§ 16.3. Расчет методом интегрируемой нелинейной аппроксимации	530
§ 16.4. Расчет методом кусочно-линейной аппроксимации	531
§ 16.5. Расчет переходных процессов в нелинейных цепях методом переменных состояния на ЭВМ	532
§ 16.6. Метод медленно меняющихся амплитуд	533
§ 16.7. Метод малого параметра	537
§ 16.8. Метод интегральных уравнений	541
§ 16.9. Переходные процессы в цепях с терморезисторами	542

§ 16.10. Переходные процессы в цепях с управляемыми нелинейными индуктивными элементами	543
§ 16.11. Переходные процессы в нелинейных электромеханических системах	545
§ 16.12. Переходные процессы в схемах с управляемыми источниками с учетом их нелинейных и частотных свойств	547
§ 16.13. Перемагничивание ферритовых сердечников импульсами тока	548
§ 16.14. Фазовая плоскость и характеристика областей ее применения	550
§ 16.15. Интегральные кривые, фазовая траектория и предельный цикл	550
§ 16.16. Изображение простейших процессов на фазовой плоскости ..	551
§ 16.17. Изоклины. Особые точки. Построение фазовых траекторий ..	552
<i>Вопросы для самопроверки</i>	554
Глава семнадцатая. Основы теории устойчивости режимов работы нелинейных цепей	555
§ 17.1. Устойчивость "в малом" и "в большом". Устойчивость по Ляпунову	555
§ 17.2. Общие основы исследования устойчивости "в малом"	556
§ 17.3. Исследование устойчивости состояния равновесия в системах с постоянной вынуждающей силой	558
§ 17.4. Исследование устойчивости автоколебаний и вынужденных колебаний по первой гармонике	560
§ 17.5. Исследование устойчивости состояния равновесия в генераторе релаксационных колебаний	562
§ 17.6. Исследование устойчивости периодического движения в ламповом генераторе синусоидальных колебаний	564
§ 17.7. Исследование устойчивости работы электрических цепей, содержащих управляемые источники напряжения (тока) с учетом их неидеальности	564
<i>Вопросы для самопроверки</i>	565
Глава восемнадцатая. Электрические цепи с переменными во времени параметрами	565
§ 18.1. Элементы цепей	565
§ 18.2. Общие свойства электрических цепей	566
§ 18.3. Расчет электрических цепей в установившемся режиме	568
§ 18.4. Параметрические колебания	571
§ 18.5. Параметрические генератор и усилитель	573
<i>Вопросы для самопроверки</i>	574
Литература к II части	576
Приложения	578
Приложение А	578
Направленные и ненаправленные графы	578
§ А.1. Характеристика двух направлений в теории графов	578
I. Направленные графы	578
§ А.2. Основные определения	578
§ А.3. Переход от изучаемой системы к направленному графу	579
§ А.4. Общая формула для передачи направленного (сигнального) графа ..	581
II. Ненаправленные графы	583
§ А.5. Определение и основная формула	583
§ А.6. Определение числа деревьев графа	584
§ А.7. Разложение определителя по путям между двумя произвольно выбранными узлами	584
§ А.8. Применение основной формулы	585
§ А.9. Сопоставление направленных и ненаправленных графов	588
Приложение Б	589

Имитированные элементы электрических цепей	589
Приложение В	593
Исследование процессов в неэлектрических системах на электрических моделях-аналогах	593
Приложение Г	595
Случайные процессы в электрических цепях	595
§ Г.1. Случайные процессы. Корреляционные функции	595
§ Г.2. Прямое и обратное преобразования Фурье для случайных функций времени	597
§ Г.3. Белый шум и его свойства	597
§ Г.4. Источники внутренних шумов в электрических цепях	598
Приложение Д	599
Дискретные сигналы и их обработка	599
§ Д.1. Теорема Котельникова	599
§ Д.2. Частотный спектр дискретизированного сигнала	600
§ Д.3. Дискретизация частотного спектра	601
§ Д.4. Прямое преобразование Фурье дискретизированного сигнала	602
§ Д.5. Определение непрерывного сигнала $x(t)$ по коэффициентам ДПФ	603
§ Д.6. Обратное дискретное преобразование Фурье	603
§ Д.7. Вычисление дискретного преобразования Фурье. Быстрое преобразование Фурье	604
§ Д.8. Дискретная свертка во временной и частотной областях	604
Приложение Е	606
Частотные преобразования	606
§ Е.1. Классификация частотных преобразований	606
§ Е.2. Частотные преобразования первого рода	606
§ Е.3. Частотные преобразования второго рода	609
§ Е.4. Частотные преобразования цепей с распределенными параметрами	610
§ Е.5. Преобразование Брутона	611
Приложение Ж	613
Z-преобразование цифровых сигналов	613
§ Ж.1. Прямое Z-преобразование цифровых сигналов	613
§ Ж.2. Решение дифференциальных уравнений путем сведения их к разностным	614
§ Ж.3. Дискретная свертка	615
§ Ж.4. Теорема смещения для цифрового сигнала	615
§ Ж.5. Передаточная функция цифрового четырехполюсника	616
§ Ж.6. Соответствие между комплексной частотой p и параметром z дискретного z -преобразования	616
§ Ж.7. Обратное z -преобразование	616
§ Ж.8. Соответствие между полюсами аналогового и цифрового четырехполюсников	616
§ Ж.9. Переход от передаточной функции аналогового четырехполюсника к передаточной функции соответствующего цифрового	619
Приложение З	620
Цифровые фильтры	620
§ З.1. Введение	620
§ З.2. Элементарная база цифровых фильтров	620
§ З.3. Классификация цифровых фильтров по виду передаточной функции $K(z)$	620
§ З.4. Алгоритм получения передаточной функции цифрового фильтра	621
§ З.5. Зависимость модуля и аргумента $K(z)$ от частоты	622
§ З.6. Частотные преобразования цифровых фильтров	622
§ З.7. Реализация передаточных функций цифровых фильтров	623