ВЫСШЕЕ
ОБРАЗОВАНИЕ

Ю. А. Комиссаров, Л. С. Гордеев,
Д. П. Вент, Г. И. Бабокин

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ, МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

2-е издание

Курс с онлайн-оцениванием

УМО ВО
РЕКОМЕНДУЕТ

Юрайт
издательство

Оглавление

Авторский коллектив **13**
Предисловие **15**
Сокращения и обозначения **19**

Глава 1. Электрические цепи постоянного тока **21**
1.1. Введение 21
1.2. Электрическая цепь и ее топология 22
1.3. Резистивный элемент 25
1.4. Источники электрической энергии постоянного тока 27
1.5. Первый и второй законы Кирхгофа 31
1.6. Работа и мощность электрического тока. Энергетический баланс 32
1.7. Преобразование участков электрической цепи 34
1.8. Анализ и расчет электрической цепи постоянного тока с одним источником электрической энергии. Метод эквивалентных преобразований 38
1.9. Анализ и расчет разветвленных электрических цепей с несколькими источниками энергии 39
1.9.1. Метод двух узлов 40
1.9.2. Метод контурных токов 41
1.9.3. Метод наложения (суперпозиции) 45
1.9.4. Метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника) 47
1.10. Условие передачи максимальной мощности приемнику 50
1.11. Анализ схемы четырехплечего моста 52

Глава 2. Электрические цепи синусоидального тока **54**
2.1. Введение 54
2.2. Индуктивный и емкостный элементы цепи синусоидального тока 55
2.3. Основные параметры, характеризующие синусоидальные токи, ЭДС и напряжения 60
2.4. Изображение синусоидальных функций в комплексной форме 62
2.5. Однофазные электрические цепи синусоидального тока 66
2.5.1. Законы Кирхгофа для цепи синусоидального тока 66
2.5.2. Синусоидальный ток в цепи с активным сопротивлением 66
2.5.3. Синусоидальный ток в электрической цепи с индуктивностью 69
2.5.4. Синусоидальный ток в электрической цепи с емкостью 72
2.5.5. Синусоидальный ток в электрической цепи с последовательным включением активного сопротивления (R) и индуктивности (L) 75

2.5.6. Синусоидальный ток в электрической цепи с последовательным включением активного сопротивления (*R*) и емкости (*C*) 77
2.5.7. Синусоидальный ток в электрической цепи с последовательным включением сопротивления (*R*), индуктивности (*L*) и емкости (*C*) 79
2.5.8. Законы Кирхгофа в комплексной форме. Расчет электрических цепей синусоидального тока 82
2.6. Резонанс напряжений 85
2.7. Переменный синусоидальный ток в цепи с параллельным включением потребителей электроэнергии 89
2.8. Резонанс токов 94
2.8.1. Условие получения резонанса токов в цепи 94
2.8.2. Векторная диаграмма цепи при резонансе токов 97
2.8.3. Коэффициент мощности cosj и его экономическое значение 98
2.9. Лабораторные, семинарские и курсовые работы. Расчет электрических цепей на ЭВМ 100
2.9.1. Лабораторная работа № 1. Неразветвленная электрическая сеть синусоидального тока с активно-реактивными сопротивлениями. Резонанс напряжений 112
2.9.2. Расчет электрических цепей с последовательным соединением активно-реактивных сопротивлений. Резонанс напряжений (семинар). Программа CON1_1 116
2.9.3. Лабораторная работа № 2. Разветвленная электрическая цепь синусоидального тока с активно-реактивными сопротивлениями. Резонанс токов 120
2.9.4. Расчет электрических цепей с параллельным соединением активно-реактивных сопротивлений. Резонанс токов (семинар). Программа CON2_1 123
2.9.5. Элементы электрических цепей переменного тока 127
2.9.6. Законы Ома и Кирхгофа в цепях переменного тока 128
2.9.7. Расчет замкнутого контура электрических цепей с одним или несколькими источниками питания (семинар). Программа CON3_1 131
2.9.8. Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов (семинар). Программа CON4_1 134
2.9.9. Расчет сложных электрических цепей методом межузлового напряжения (семинар). Программа CON5_1 138
2.9.10. Частотные характеристики электрических цепей 143
2.9.11. Расчет однофазных многоконтурных цепей переменного синусоидального тока (курсовая работа) 151

Глава 3. Нелинейные электрические и магнитные цепи 157

3.1. Классификация нелинейных элементов 157
3.2. Методы расчета нелинейных цепей 158
3.3. Нелинейные электрические цепи постоянного тока 159
3.3.1. Графический метод анализа нелинейных цепей 160
3.3.2. Аналитический метод анализа электрических цепей 163

3.4. Магнитные цепи с постоянной магнитодвижущей силой 166
3.4.1. Понятие о магнитной цепи 166
3.4.2. Вебер-амперная характеристика участка магнитной цепи 170
3.4.3. Законы Кирхгофа для разветвленных магнитных цепей 172
3.4.4. Расчет неразветвленной магнитной цепи 174
3.4.5. Расчет разветвленной магнитной цепи 175
3.5. Магнитные цепи с переменной магнитодвижущей силой 176
3.5.1. Процесс намагничивания магнитопровода 178
3.5.2. Магнитные потери в реальном магнитопроводе 179
3.5.3. Схема замещения и векторная диаграмма реальной катушки индуктивности 181
3.5.4. Феррорезонанс напряжений и тока 183

Глава 4. Трехфазные электрические цепи синусоидального тока 186

4.1. Понятие о трехфазных цепях и их преимуществах 186
4.2. Способы соединения фаз генератора 188
4.2.1. Соединение фаз генератора звездой 188
4.2.2. Соединение фаз генератора в треугольник 190
4.3. Схема соединения генератора и потребителей звездой с нейтральным проводом 192
4.4. Симметричный трехфазный потребитель, соединенный звездой 194
4.5. Симметричный трехфазный потребитель, соединенный треугольником 197
4.6. Мощность потребителя трехфазного тока 201
4.6.1. Измерение мощности в трехфазных электрических цепях 202
4.6.2. Измерение мощности симметричного трехфазного потребителя, соединенного звездой или треугольником 202
4.6.3. Измерение мощности трехфазных потребителей методом двух ваттметров 203
4.7. Примеры расчета на ЭВМ трехфазных электрических цепей 204
4.7.1. Расчет токов потребителя электроэнергии $П_1$, соединенного звездой 206
4.7.2. Расчет токов потребителя электроэнергии $П_2$, соединенного треугольником 208
4.7.3. Расчет токов симметричного потребителя электроэнергии $П_3$ 209
4.7.4. Расчет трехфазных электрических цепей с помощью определителей 210
4.8. Лабораторная работа № 3. Трехфазные электрические цепи при соединении потребителей звездой и треугольником 212
4.9. Расчет трехфазных потребителей электрической энергии, соединенных звездой (семинар). Программа CON6_1 217
4.10. Расчет трехфазных потребителей электрической энергии, соединенных треугольником (семинар). Программа CON 7_1 220
4.11. Варианты соединения трехфазных потребителей и их векторные диаграммы. Аварийные режимы трехфазных потребителей 223

4.11.1. Соединение фаз потребителя звездой с нейтральным проводом и симметричной нагрузкой 223
4.11.2. Соединение фаз потребителя звездой с нейтральным проводом и несимметричной нагрузкой 224
4.11.3. Соединение фаз потребителя звездой с нейтральным проводом и обрывом одной из фаз 224
4.11.4. Соединение фаз потребителя звездой с нейтральным проводом и обрывом линейного провода 225
4.11.5. Соединение фаз потребителя звездой без нейтрального провода при симметричной нагрузке 226
4.11.6. Соединение фаз потребителя звездой без нейтрального провода при несимметричной нагрузке 227
4.11.7. Соединение фаз потребителя звездой без нейтрального провода и при коротком замыкании фазы 227
4.11.8. Соединение фаз потребителя звездой с несимметричной нагрузкой без нейтрального провода и с обрывом фазы 229
4.11.9. Соединение фаз потребителя звездой без нейтрального провода и с обрывом линейного провода 230
4.11.10. Соединение фаз потребителя треугольником при симметричной нагрузке 231
4.11.11. Соединение фаз потребителей треугольником при несимметричной нагрузке 232
4.11.12. Соединение фаз потребителя треугольником с обрывом фазы 233
4.11.13. Соединение фаз потребителя треугольником при обрыве линейного провода 233
4.12. Расчет трехфазных цепей (курсовая работа) 235

Глава 5. Электрооборудование промышленных предприятий 240

5.1. Трансформаторы 240
5.1.1. Принцип действия и область применения трансформаторов 241
5.1.2. Приведенный трансформатор 243
5.1.3. Схема замещения приведенного трансформатора 244
5.1.4. Потери мощности в трансформаторе 245
5.1.5. Опыт холостого хода трансформатора 247
5.1.6. Опыт короткого замыкания трансформатора 250
5.1.7. Рабочий режим трансформатора 252
5.1.8. Трехфазные трансформаторы 254
5.2. Асинхронные машины 256
5.2.1. Устройство асинхронного двигателя трехфазного тока 257
5.2.2. Принцип действия асинхронного электродвигателя 259
5.2.3. Схема замещения асинхронного электродвигателя 264
5.2.4. Механические характеристики асинхронных электродвигателей 265
5.2.5. Расчет мощности приводных нерегулируемых асинхронных двигателей ряда механизмов 268
5.2.6. Способы регулирования частоты вращения (числа оборотов в минуту) асинхронного электродвигателя 271

5.2.7. Пуск асинхронных двигателей 276
5.2.8. Тормозные режимы работы асинхронных двигателей....281
5.3. Синхронные машины....285
5.3.1. Устройство трехфазной синхронной машины 285
5.3.2. Принцип действия трехфазного синхронного электродвигателя....287
5.3.3. Механическая характеристика синхронного электродвигателя. Пуск электродвигателя 288
5.3.4. Область применения синхронных двигателей 289
5.3.5. Схемы управления синхронными двигателями....290
5.4. Машины постоянного тока 292
5.4.1. Устройство машины постоянного тока 293
5.4.2. Принцип действия двигателя постоянного тока 295
5.4.3. Электродвижущая сила якоря и электромагнитный момент двигателя....296
5.4.4. Естественная электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения 298
5.4.5. Работа двигателя постоянного тока независимого возбуждения в двигательном режиме 301
5.4.6. Расчет естественной механической характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением по номинальным данным....302
5.4.7. Естественные электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением....303
5.4.8. Расчет естественных электромеханических и механических характеристик двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением по универсальным характеристикам....306
5.4.9. Естественные электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения 308
5.5. Микроэлектродвигатели электронных устройств 310
5.5.1. Классификация микроэлектродвигателей....310
5.5.2. Принцип действия и устройство однофазного асинхронного электродвигателя....312
5.5.3. Однофазные асинхронные электродвигатели с пусковыми элементами (емкостью или сопротивлением) 314
5.5.4. Однофазные асинхронные конденсаторные электродвигатели 315
5.5.5. Универсальные асинхронные электродвигатели....317
5.5.6. Синхронные микроэлектродвигатели с постоянными магнитами....318
5.5.7. Синхронный реактивный микродвигатель....320
5.5.8. Синхронный гистерезисный микродвигатель....322
5.5.9. Коллекторные микродвигатели постоянного тока....324
5.5.10. Коллекторные микродвигатели переменного тока 328

5.5.11. Универсальные коллекторные двигатели 331
5.6. Управление исполнительными двигателями 332
5.6.1. Требования, предъявляемые к исполнительным электродвигателям 333
5.6.2. Управление исполнительными двигателями постоянного тока 334
5.6.3. Управление асинхронными исполнительными двигателями 341
5.7. Шаговый электродвигатель 346
5.7.1. Устройство и принцип действия шагового двигателя 346
5.7.2. Выполнение обмоток статора шаговых двигателей 350
5.7.3. Способы управления шаговым двигателем 351
5.7.4. Момент шагового двигателя 354
5.7.5. Механическая характеристика шагового двигателя 356

Глава 6. Полупроводниковые приборы 358

6.1. Полупроводниковые диоды 358
6.1.1. Электронно-дырочная проводимость 358
6.1.2. Свойства p-n-перехода 360
6.1.3. Полупроводниковые приборы и устройства 361
6.1.4. Свойства полупроводниковых диодов 364
6.1.5. Диоды общего назначения 365
6.2. Биполярные транзисторы 366
6.3. Полевые транзисторы 369
6.4. Тиристоры 373
6.5. Схема управления триодными тиристорами 376
6.6. Запираемые триодные тиристоры и симисторы 378
6.7. Тиристорное управление электроприводом 379

Глава 7. Выпрямление переменного тока 384

7.1. Диодные схемы 384
7.1.1. Диодный ограничитель амплитуды напряжения 384
7.1.2. Диод как выпрямитель напряжения 385
7.2. Неуправляемые выпрямительные устройства (выпрямители) 385
7.2.1. Схема однополупериодного выпрямителя и выбор ее параметров 386
7.2.2. Схема двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой 389
7.2.3. Мостовая схема однофазного двухполупериодного выпрямителя 393
7.3. Трехфазные выпрямители 395
7.3.1. Трехфазный выпрямитель с нулевым выводом 396
7.3.2. Трехфазный мостовой выпрямитель 400
7.3.3. Трехфазный выпрямитель с уравнительным реактором 404
7.4. Сглаживающие фильтры 409
7.4.1. Индуктивные фильтры 411
7.4.2. Емкостные фильтры 413

7.5. Выпрямитель с удвоением напряжения 415
7.6. Управляемые выпрямители 417

Глава 8. Усилительные каскады 424

8.1. Схемы включения транзисторов и их коэффициенты усиления по переменному току 425
8.2. Статические и динамические характеристики транзисторов 429
8.3. Режимы работы усилительных каскадов 432
8.4. Усилительный каскад с общим эмиттером 435
8.5. Частотная характеристика усилительного каскада и ее анализ 438
8.6. Обратные связи в усилителях 442

Глава 9. Операционные усилители. Цифровые устройства. Элементы автоматики 446

9.1. Дифференциальный усилитель 446
9.2. Операционный усилитель 447
9.2.1. Операционный усилитель с отрицательной обратной связью 448
9.2.2. Повторитель входного напряжения 449
9.2.3. Неинвертирующий усилитель 449
9.2.4. Инвертирующий усилитель 450
9.2.5. Дифференциальный усилитель 450
9.2.6. Сумматор 451
9.2.7. Интегратор 452
9.2.8. Дифференциатор 454
9.3. Математическая и электронная модель объекта исследования 455
9.3.1. Примеры применения операционных усилителей как элементов аналоговых вычислительных машин 456
9.4. Дискретные логические и цифровые микросхемы 463
9.4.1. Логические микросхемы 464
9.4.2. Дешифратор 470
9.4.3. Шифратор 471
9.4.4. Мультиплексор 472
9.4.5. Триггеры 473
9.4.6. Импульсные микросхемы 476
9.4.7. Счетчик импульсов 477
9.4.8. Цифро-аналоговый преобразователь 482
9.4.9. Аналого-цифровой преобразователь 484
9.5. Электронные вычислительные машины 486
9.5.1. Процессор 488
9.5.2. Оперативное запоминающее устройство 489
9.5.3. Постоянное запоминающее устройство 490
9.5.4. Накопители на магнитных дисках 491
9.5.5. Устройство ввода/вывода 491
9.5.6. Интерфейс 492
9.5.7. Устройство связи с объектом 492
9.5.8. Контроллеры 493

Глава 10. Основы электроснабжения промышленных предприятий 494
10.1. Источники электрической и тепловой энергии 494
10.2. Электроэнергетические системы 500
10.3. Основные потребители электроэнергии 503
10.4. Электроснабжение промышленного предприятия 507
10.5. Электропривод — основной потребитель электрической энергии 511
10.5.1. Уравнения движения электропривода 512
10.5.2. Нагревание и охлаждение электродвигателя 513
10.5.3. Режимы работы электродвигателей 515
10.5.4. Расчет мощности электродвигателя 517
10.5.5. Выбор электродвигателя 521
10.6. Определение электрической нагрузки в схеме электроснабжения 527
10.7. Расчет низковольтных электросетей по допустимой плотности тока и потере напряжения 529
10.8. Электробезопасность 531

Глава 11. Электротехнологии и электротехнологические установки 537
11.1. Основные понятия 537
11.2. Электротермические технологии и установки 538
11.2.1. Электроустановки резистивного нагрева 539
11.2.2. Варка стекла с помощью электрических печей прямого нагрева 540
11.2.3. Электроустановки индукционного нагрева 541
11.2.4. Электроустановки высокоинтенсивного нагрева 543
11.2.5. Диэлектрический нагрев 546
11.3. Электрохимические и электрофизические технологии и установки 547
11.3.1. Электролизные установки 548
11.3.2. Электрооборудование электролизных производств 551
11.3.3. Электрохимическая обработка материалов 554
11.3.4. Электроэрозионные технологии и установки 556
11.3.5. Электрохимико-механические установки 558
11.4. Электрокинетические технологии и установки 560
11.4.1. Электроосаждение частиц и электрофильтры 560
11.4.2. Установки для разделения сыпучих смесей 563
11.4.3. Установки для разделения эмульсий и суспензий 564
11.4.4. Опреснительные установки 565
11.4.5. Установки электростатической окраски 566
11.5. Электросварочные технологии и установки 567
11.6. Электроосвещение 569
11.6.1. Электрические лампы накаливания 570
11.6.2. Люминесцентные лампы низкого давления 571
11.6.3. Дуговые ртутно-кварцевые лампы высокого давления 575

Приложение 1. Структура программного обеспечения для расчета электрических цепей 578
Приложение 2. Переходные процессы в линейных электрических цепях 580
П2.1. Законы коммутации 580
П2.2. Классический метод расчета переходных процессов 582
П2.3. Переходные процессы в цепи постоянного тока с одним индуктивным элементом 583
П2.4. Переходные процессы в цепи постоянного тока с одним емкостным элементом 588
П2.5. Разрядка емкостного элемента в цепи с резистивным и индуктивным элементами 592
П2.6. Подключение неразветвленной цепи с индуктивным, резистивным и емкостным элементами к источнику постоянной ЭДС 596
П2.7. Подключение последовательного соединения индуктивного и резистивного элементов к источнику синусоидальной ЭДС 598
Рекомендуемая литература 600