



# МИР физики и техники

Г. ШАТЕНЬЕ, Д. БУИ, М. БОЭ,  
Ж. ВАЙАН, Д. ВЕРКИНДЕР

Учебник  
по общей  
электротехнике

Перевод с французского  
к.т.н. В.Н. Грасевича

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2022

УДК 621.3  
ББК 31.2  
Ш28

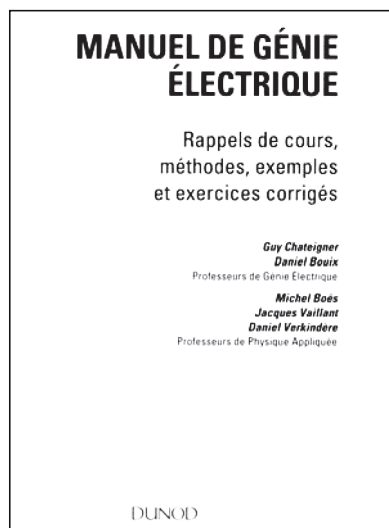
**Ш28 Шатенье Г., Буи Д., Боэ М., Вайан Ж., Веркиндер Д.**

**Учебник по общей электротехнике**

**Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2022. – 624 с. ISBN 978-5-94836-653-1**

В учебнике приводятся основные понятия и методы общей электротехники, преподаваемые на первом курсе обучения в высшей школе Франции. Курс состоит из 5 больших частей: «Электричество и сигналы», «Электронные составляющие», «Электроника сигналов», «Силовая электроника», «Электрические машины». Использование множества прикладных примеров облегчает восприятие и позволяет самостоятельно проверить качество усвоения материала.

Учебник адресован студентам и преподавателям технических университетов, подготовительных курсов, бакалаврам, а также станет полезным справочником для инженеров-исследователей, специалистов в области электротехники, электроники, промышленной информатики.



© Dunod, Paris 2006.

© АО РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский  
язык, оригинал-макет, оформление, 2022

**ISBN 978-5-94836-653-1**

**ISBN 2-10-048499-0 (франц.)**

# Содержание

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| Предисловие к изданию на русском языке ..... | 21 |
| Предисловие .....                            | 23 |
| Величины. Единицы. Наименования в СИ .....   | 24 |

## Часть I. Электричество и его переменные

### Глава 1

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Что такое электричество? .....                                              | 28 |
| 1.1. Частицы. Электрические заряды и носители зарядов .....                 | 28 |
| 1.1.1. Частицы и электрические заряды .....                                 | 28 |
| 1.1.2. Электростатические силы. Закон Кулона .....                          | 29 |
| 1.1.3. Электрическое поле .....                                             | 30 |
| 1.2. Явление проводимости. Электрический ток .....                          | 30 |
| 1.2.1. Электрический ток .....                                              | 30 |
| 1.2.2. Свободные и связанные заряды .....                                   | 31 |
| 1.2.3. Электрические среды .....                                            | 32 |
| 1.2.4. Влияние температуры .....                                            | 34 |
| 1.2.5. Частотные свойства. Поверхностный эффект в проводнике .....          | 34 |
| 1.3. Электрический потенциал заряда .....                                   | 35 |
| 1.3.1. Цель .....                                                           | 35 |
| 1.3.2. Работа при переносе заряда $Q$ на расстояние $r$ от заряда $q$ ..... | 36 |
| 1.3.3. Электрический потенциал .....                                        | 36 |
| 1.3.4. Разность электрических потенциалов. Электрическое напряжение .....   | 37 |

### Глава 2

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Основные законы электричества .....                                    | 38 |
| 2.1. Двухполюсники .....                                               | 38 |
| 2.1.1. Определение. Условности .....                                   | 38 |
| 2.1.2. Линейный двухполюсник. Линейная цепь .....                      | 38 |
| 2.1.3. Элементарные двухполюсники .....                                | 39 |
| 2.1.4. Принципиальные ограничения использования<br>двухполюсника ..... | 41 |
| 2.1.5. Характеристика двухполюсника .....                              | 42 |
| 2.1.6. Рабочая точка двухполюсника .....                               | 42 |
| 2.1.7. Соединение двухполюсников .....                                 | 43 |
| 2.2. Теоремы об электрических цепях .....                              | 45 |



|                                              |                                                                                                                                 |           |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.1.                                       | Законы Кирхгофа .....                                                                                                           | 45        |
| 2.2.2.                                       | Пассивирование (компенсация) источника .....                                                                                    | 46        |
| 2.2.3.                                       | Теорема суперпозиции .....                                                                                                      | 46        |
| 2.2.4.                                       | Теоремы Тевенена и Нортонa.....                                                                                                 | 48        |
| 2.2.5.                                       | Теорема Миллмана .....                                                                                                          | 51        |
| 2.2.6.                                       | Делитель напряжения. Делитель тока .....                                                                                        | 51        |
| 2.2.7.                                       | Теорема Кеннели. Преобразования треугольник-звезда<br>и звезда-треугольник (эквивалентность схем звезда<br>и треугольник) ..... | 52        |
| 2.2.8.                                       | Принцип линейности .....                                                                                                        | 53        |
| <br><b>Глава 3</b>                           |                                                                                                                                 |           |
| <b>Электростатика.....</b>                   |                                                                                                                                 | <b>54</b> |
| 3.1.                                         | Электрическое поле и электрическая индукция.....                                                                                | 54        |
| 3.1.1.                                       | Напряженность .....                                                                                                             | 54        |
| 3.1.2.                                       | Поток через поверхность S .....                                                                                                 | 55        |
| 3.1.3.                                       | Теорема Гаусса .....                                                                                                            | 56        |
| 3.2.                                         | Электрический потенциал .....                                                                                                   | 57        |
| 3.2.1.                                       | Определение .....                                                                                                               | 57        |
| 3.2.2.                                       | Расчет электрического поля с использованием<br>потенциала V .....                                                               | 58        |
| 3.3.                                         | Принцип действия конденсатора .....                                                                                             | 59        |
| 3.3.1.                                       | Устройство и принцип действия.....                                                                                              | 59        |
| 3.3.2.                                       | Диэлектрическая прочность.....                                                                                                  | 60        |
| 3.3.3.                                       | Емкость и накопленный заряд конденсатора .....                                                                                  | 60        |
| 3.3.4.                                       | Электрическая энергия, запасенная конденсатором.....                                                                            | 61        |
| <br><b>Глава 4</b>                           |                                                                                                                                 |           |
| <b>Электромагнетизм. Ферромагнетизм.....</b> |                                                                                                                                 | <b>63</b> |
| 4.1.                                         | Магнитное поле .....                                                                                                            | 63        |
| 4.1.1.                                       | Физическая природа.....                                                                                                         | 63        |
| 4.1.2.                                       | Источники магнитного поля .....                                                                                                 | 63        |
| 4.1.3.                                       | Расчет вектора напряженности $\vec{H}$ . Теорема Ампера .....                                                                   | 64        |
| 4.2.                                         | Магнитная индукция .....                                                                                                        | 68        |
| 4.3.                                         | Немагнитные среды.....                                                                                                          | 68        |
| 4.4.                                         | Ферромагнитные среды .....                                                                                                      | 69        |
| 4.4.1.                                       | Расчет напряженности магнитного поля и индукции .....                                                                           | 69        |
| 4.4.2.                                       | Относительная проницаемость среды $\mu_r$ .....                                                                                 | 69        |
| 4.4.3.                                       | Динамическая проницаемость .....                                                                                                | 70        |
| 4.4.4.                                       | Магнитные потери .....                                                                                                          | 71        |

|        |                                                        |    |
|--------|--------------------------------------------------------|----|
| 4.5.   | Поток магнитной индукции .....                         | 71 |
| 4.5.1. | Ориентирование поверхности $S$ (рис. 4.11) .....       | 71 |
| 4.5.2. | Поток через поверхность. Определения .....             | 71 |
| 4.5.3. | Идеальная магнитная цепь (ИМЦ) .....                   | 72 |
| 4.6.   | Магнитное сопротивление идеальной магнитной цепи ..... | 72 |
| 4.7.   | Поток самоиндукции .....                               | 74 |
| 4.7.1. | Физическое явление .....                               | 74 |
| 4.7.2. | Индуктивность. Определение .....                       | 74 |
| 4.8.   | Цепи с переменным потоком .....                        | 75 |
| 4.8.1. | Физическое явление. Закон Фарадея .....                | 75 |
| 4.8.2. | Закон Фарадея .....                                    | 76 |
| 4.8.3. | Правило наибольшего потока .....                       | 76 |
| 4.8.4. | Электромагниты .....                                   | 76 |

## Глава 5

### Установившиеся синусоидальные процессы в однофазных системах .....

78

|        |                                                                        |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.   | Свойства синусоидальных величин .....                                  | 78 |
| 5.2.   | Установившиеся синусоидальные процессы. Методы расчетов .....          | 80 |
| 5.2.1. | Векторное построение Фрезеля .....                                     | 80 |
| 5.2.2. | Использование комплексных чисел .....                                  | 82 |
| 5.2.3. | Выражения для комплексных чисел .....                                  | 83 |
| 5.3.   | Полные комплексные сопротивление и проводимость<br>двухполюсника ..... | 83 |
| 5.4.   | Мощности. Коэффициент мощности .....                                   | 85 |
| 5.5.   | Добротность. Последовательно-параллельное преобразование .....         | 90 |
| 5.5.1. | Добротность .....                                                      | 90 |
| 5.5.2. | Последовательно-параллельное преобразование .....                      | 91 |
| 5.6.   | Резонансные цепи .....                                                 | 91 |
| 5.7.   | Частотные свойства. Комплексная передаточная функция .....             | 94 |
| 5.7.1. | Передаточная функция .....                                             | 94 |
| 5.7.2. | Диаграмма Боде .....                                                   | 97 |

## Глава 6

### Установившиеся синусоидальные процессы в трехфазных системах .....

100

|        |                                         |     |
|--------|-----------------------------------------|-----|
| 6.1.   | Трехфазные установки. Определения ..... | 100 |
| 6.2.   | Соединения .....                        | 104 |
| 6.2.1. | Соединение в звезду .....               | 104 |
| 6.2.2. | Соединение в треугольник .....          | 105 |



|        |                                                      |     |
|--------|------------------------------------------------------|-----|
| 6.3.   | Мощности. Коэффициент мощности .....                 | 106 |
| 6.3.1. | Общий случай.....                                    | 106 |
| 6.3.2. | Трёхфазные генератор и потребитель симметричны ..... | 106 |

## Глава 7

### Динамический режим. Среднее и действующее значения ... 109

|        |                                         |     |
|--------|-----------------------------------------|-----|
| 7.1.   | Динамический режим .....                | 109 |
| 7.2.   | Среднее значение .....                  | 110 |
| 7.2.1. | Среднее значение тока.....              | 110 |
| 7.2.2. | Определения (табл. 7.1).....            | 110 |
| 7.3.   | Действующее значение.....               | 112 |
| 7.3.1. | Действующее значение тока .....         | 112 |
| 7.3.2. | Определения (табл. 7.2).....            | 112 |
| 7.4.   | Разложение периодического сигнала ..... | 113 |
| 7.5.   | Свойства сигнала .....                  | 114 |

## Глава 8

### Периодический процесс. Ряды Фурье ..... 117

|        |                                                      |     |
|--------|------------------------------------------------------|-----|
| 8.1.   | Ряды Фурье .....                                     | 117 |
| 8.1.1. | Основная теорема .....                               | 117 |
| 8.1.2. | Расчет коэффициентов.....                            | 118 |
| 8.1.3. | Соотношения между коэффициентами .....               | 118 |
| 8.1.4. | Свойства. Упрощение расчетов .....                   | 118 |
| 8.1.5. | Формула Бесселя – Парсеваля.....                     | 120 |
| 8.2.   | Физический смысл периодических процессов .....       | 120 |
| 8.2.1. | Периодический режим. Периодический сигнал .....      | 120 |
| 8.2.2. | Разложение периодического сигнала. Терминология..... | 120 |
| 8.2.3. | Действующее значение и средняя мощность.....         | 122 |
| 8.2.4. | Оценка сигнала.....                                  | 124 |
| 8.2.5. | Приложение к линейным системам.....                  | 124 |
| 8.3.   | Графическое представление спектров.....              | 126 |
| 8.3.1. | Представление в функции времени .....                | 126 |
| 8.3.2. | Частотные свойства .....                             | 126 |
| 8.4.   | Некоторые классические сигналы .....                 | 129 |

## Глава 9

### Переходные процессы в линейной системе ..... 133

|        |                                                       |     |
|--------|-------------------------------------------------------|-----|
| 9.1.   | Линейная система .....                                | 133 |
| 9.2.   | Общий принцип исследования переходных процессов ..... | 134 |
| 9.2.1. | Воздействующие сигналы.....                           | 134 |
| 9.2.2. | Математическое описание электрической цепи.....       | 134 |

|        |                                                                 |     |
|--------|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 9.2.3. | Решение дифференциального уравнения.....                        | 135 |
| 9.2.4. | Переходный и установившийся режимы .....                        | 137 |
| 9.3.   | Линейная система первого порядка.....                           | 137 |
| 9.3.1. | Методы решения дифференциального уравнения.....                 | 137 |
| 9.3.2. | Переходная характеристика цепи .....                            | 138 |
| 9.3.3. | Простейшие электрические схемы .....                            | 140 |
| 9.4.   | Линейная система второго порядка .....                          | 146 |
| 9.4.1. | Последовательность решения дифференциального<br>уравнения ..... | 146 |
| 9.4.2. | Переходная характеристика.....                                  | 148 |
| 9.4.3. | Элементарные электрические цепи .....                           | 152 |

## Глава 10

|                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Символический метод. Преобразование Лапласа</b> .....                       | <b>155</b> |
| 10.1. Функция воздействия .....                                                | 155        |
| 10.2. Единичные импульсы Дирака .....                                          | 156        |
| 10.2.1. Определение и понятие .....                                            | 157        |
| 10.2.2. Соотношения при единичной ступени.....                                 | 158        |
| 10.2.3. Умножение функции на импульс Дирака .....                              | 158        |
| 10.2.4. Производная в точке разрыва .....                                      | 159        |
| 10.3. Преобразование Лапласа .....                                             | 159        |
| 10.3.1. Определение .....                                                      | 159        |
| 10.3.2. Таблица ПЛ некоторых распространенных функций .....                    | 161        |
| 10.3.3. Свойства и теоремы .....                                               | 161        |
| 10.3.4. Нахождение изображения $F$ функции $f$ .....                           | 163        |
| 10.3.5. Нахождение оригинала $f$ по изображению $F$ .....                      | 165        |
| 10.4. Исследование линейной системы .....                                      | 169        |
| 10.4.1. Использование ПЛ при исследовании линейной системы ..                  | 169        |
| 10.4.2. Передаточная функция Лапласа .....                                     | 171        |
| 10.4.3. Импульсный отклик. Воздействие .....                                   | 171        |
| 10.4.4. Соответствие передаточной функции<br>дифференциальному уравнению ..... | 172        |
| 10.4.5. Описание электрической цепи .....                                      | 173        |
| 10.4.6. Временная характеристика .....                                         | 175        |
| 10.4.7. Частотные свойства или гармоники.....                                  | 176        |
| 10.5. Линейная система первого порядка.....                                    | 177        |
| 10.5.1. Простейшие передаточные функции 0-го и 1-го порядка ..                 | 178        |
| 10.5.2. Простейшие электрические цепи .....                                    | 178        |
| 10.6. Линейная система второго порядка .....                                   | 182        |
| 10.6.1. Простейшие передаточные функции второго<br>порядка (табл. 10.10) ..... | 182        |



|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| 10.6.2. Последовательная резонансная цепь (рис. 10.13) ..... | 183 |
|--------------------------------------------------------------|-----|

## Часть II. Электронные компоненты

### Глава 11

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>Сопротивления</b> ..... | 186 |
|----------------------------|-----|

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 11.1. Основная модель .....                                    | 186 |
| 11.1.1. Закон Ома. Сопротивление. Проводимость. ....           | 186 |
| 11.1.2. Соединение сопротивлений .....                         | 187 |
| 11.1.3. Мощность рассеяния .....                               | 188 |
| 11.2. Ограничения и допущения .....                            | 188 |
| 11.2.1. Максимальная мощность .....                            | 188 |
| 11.2.2. Температурный коэффициент .....                        | 189 |
| 11.2.3. Свойства при высоких частотах .....                    | 190 |
| 11.3. Переменные и подстроечные сопротивления. Потенциометры . | 191 |

### Глава 12

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| <b>Конденсаторы</b> ..... | 194 |
|---------------------------|-----|

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12.1. Основная модель .....                                                     | 194 |
| 12.1.1. Соотношение между $q$ , $u$ и $i$ . Емкость .....                       | 194 |
| 12.1.2. Соединения конденсаторов .....                                          | 196 |
| 12.1.3. Электрическое поле. Электростатическая сила .....                       | 197 |
| 12.1.4. Запасенная энергия .....                                                | 198 |
| 12.1.5. Непрерывность и стабильность электрических<br>напряжения и заряда ..... | 198 |
| 12.1.6. Синусоидальный процесс .....                                            | 198 |
| 12.2. Ограничения и допущения .....                                             | 199 |
| 12.2.1. Разрушающее поле. Номинальное напряжение .....                          | 199 |
| 12.2.2. Температурный коэффициент .....                                         | 199 |
| 12.2.3. Коэффициент напряжения .....                                            | 200 |
| 12.2.4. Частотные свойства .....                                                | 200 |

### Глава 13

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| <b>Индуктивно несвязанные катушки</b> ..... | 203 |
|---------------------------------------------|-----|

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 13.1. Основная модель .....                                        | 203 |
| 13.1.1. Соотношения между $\Phi$ , $i$ и $u$ . Индуктивность ..... | 203 |
| 13.1.2. Соединение индуктивно несвязанных катушек .....            | 205 |
| 13.1.3. Энергия, запасенная в линейной катушке .....               | 207 |
| 13.1.4. Непрерывность и стабильность тока и потока .....           | 207 |
| 13.1.5. Синусоидальный процесс .....                               | 207 |



|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 13.2. Ограничения и допущения.....                                             | 208 |
| 13.2.1. Наибольший ток. Номинальный ток.....                                   | 208 |
| 13.2.2. Температурный коэффициент .....                                        | 208 |
| 13.2.3. Токовый коэффициент .....                                              | 208 |
| 13.2.4. Частотные свойства катушки без рассеяния и без потерь<br>в железе..... | 209 |
| 13.2.5. Потери в железе. Рассеяние .....                                       | 210 |
| 13.2.6. Нелинейности при магнитном сердечнике.....                             | 211 |

## Глава 14

### Индуктивно связанные катушки..... 213

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 14.1. Основная модель .....                                                                    | 213 |
| 14.1.1. Индуктивная связь. Взаимная индуктивность .....                                        | 213 |
| 14.1.2. Соединения двух индуктивно связанных катушек.....                                      | 216 |
| 14.1.3. Запасаемая энергия индуктивно связанными катушками ..                                  | 216 |
| 14.1.4. Поток рассеяния. Поток намагничивания .....                                            | 216 |
| 14.1.5. Синусоидальный процесс.....                                                            | 218 |
| 14.2. Ограничения и допущения.....                                                             | 219 |
| 14.2.1. Сопротивления проводов. Распределенные емкости<br>катушек. Емкость связи катушек ..... | 219 |
| 14.2.2. Потери в железе. Нелинейности .....                                                    | 220 |

## Глава 15

### Трансформаторы..... 221

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 15.1. Введение .....                                                                    | 221 |
| 15.2. Идеальный трансформатор (И.Т.) .....                                              | 222 |
| 15.2.1. Гипотезы. Эквивалентная схема .....                                             | 222 |
| 15.2.2. Синусоидальный процесс.....                                                     | 222 |
| 15.3. Трансформатор без потерь и рассеяния (Т.Б.П.Р.) .....                             | 225 |
| 15.4. Трансформатор с рассеянием и потерями в меди .....                                | 226 |
| 15.5. Трансформатор с рассеянием магнитного потока, потерями<br>в меди и в железе ..... | 228 |
| 15.6. Трансформатор Каппа.....                                                          | 228 |
| 15.7. Реальный трансформатор. Нелинейности .....                                        | 229 |

## Глава 16

### Диоды..... 232

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 16.1. Диоды с PN-переходом .....           | 232 |
| 16.1.1. Обозначение. Устройство .....      | 232 |
| 16.1.2. Идеальная модель (рис. 16.3) ..... | 233 |



|         |                                                                        |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 16.1.3. | Кусочно-линейная модель (рис. 16.4) .....                              | 233 |
| 16.1.4. | Основная модель .....                                                  | 234 |
| 16.1.5. | Ограничения и допущения .....                                          | 237 |
| 16.2.   | Особенности некоторых диодов .....                                     | 241 |
| 16.2.1. | Диоды выпрямителей .....                                               | 241 |
| 16.2.2. | Диоды Зенера. Диоды — стабилизаторы напряжения<br>(стабилитроны) ..... | 241 |
| 16.2.3. | Диоды Шоттки .....                                                     | 243 |
| 16.2.4. | Диоды с переменной емкостью (варикапы) .....                           | 243 |
| 16.2.5. | PIN-диоды .....                                                        | 244 |
| 16.2.6. | Туннельные диоды .....                                                 | 244 |

## Глава 17

### Биполярные транзисторы .....

|         |                                        |     |
|---------|----------------------------------------|-----|
| 17.1.   | Условные обозначения. Устройство ..... | 246 |
| 17.2.   | Транзистор NPN-типа .....              | 247 |
| 17.2.1. | Основная модель .....                  | 247 |
| 17.2.2. | Ограничения и допущения .....          | 254 |
| 17.3.   | PNP-транзистор .....                   | 259 |
| 17.4.   | Специальные транзисторы .....          | 259 |
| 17.4.1. | Схема Дарлингтона .....                | 259 |
| 17.4.2. | Два дополнительных транзистора .....   | 260 |
| 17.4.3. | Транзистор Шоттки .....                | 261 |

## Глава 18

### МОП-транзисторы .....

|         |                                                      |     |
|---------|------------------------------------------------------|-----|
| 18.1.   | Условные обозначения. Устройство .....               | 262 |
| 18.2.   | N-канальный обогащенный полевой транзистор .....     | 263 |
| 18.2.1. | Основная модель .....                                | 263 |
| 18.2.2. | Ограничения и допущения .....                        | 269 |
| 18.3.   | P-канальный обогащенный полевой транзистор .....     | 273 |
| 18.3.1. | Основная модель .....                                | 273 |
| 18.3.2. | Ограничения и допущения .....                        | 275 |
| 18.4.   | Обедненный полевой МОП-транзистор .....              | 275 |
| 18.5.   | Логический уровень полевого транзистора .....        | 276 |
| 18.6.   | Полевой МОП-транзистор для измерения тока .....      | 276 |
| 18.7.   | Полевой МОП-транзистор с быстрым диодом .....        | 278 |
| 18.8.   | Биполярный транзистор с изолированным затвором ..... | 278 |

## Глава 19

### Тиристоры .....

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 19.1. Управляемые выпрямители (УВ) .....                             | 280 |
| 19.1.1. Назначение. Условное обозначение. ....                       | 280 |
| 19.1.2. Идеальная модель .....                                       | 280 |
| 19.1.3. Устройство. Модель двух наслоенных транзисторов .....        | 281 |
| 19.1.4. Вольт-амперная характеристика (рис. 19.5) .....              | 282 |
| 19.1.5. Отпирание УВ .....                                           | 283 |
| 19.1.6. Запирание УВ .....                                           | 284 |
| 19.1.7. Аспекты времени .....                                        | 284 |
| 19.1.8. Принципиальные ограничения .....                             | 284 |
| 19.2. Двухоперационные тиристоры .....                               | 285 |
| 19.3. Семистор .....                                                 | 286 |
| 19.3.1. Принцип действия. Условное обозначение. ....                 | 286 |
| 19.3.2. Идеальная модель (рис. 19.9) .....                           | 286 |
| 19.3.3. Устройство. Эквивалентная схема двух УВ (рис. 19.10) ....    | 287 |
| 19.3.4. Вольт-амперная характеристика (рис. 19.11) .....             | 287 |
| 19.3.5. Управление семистором .....                                  | 287 |
| 19.3.6. Запирание семистора .....                                    | 289 |
| 19.3.7. Время .....                                                  | 289 |
| 19.4. Импульсный диод .....                                          | 289 |
| 19.4.1. Принцип действия. Обозначение (рис. 19.13) .....             | 289 |
| 19.4.2. Модель, близкая к идеальной .....                            | 290 |
| 19.4.3. Вольт-амперная характеристика (рис. 19.15) .....             | 290 |
| 19.5. Проблемы внедрения тиристоров и семисторов .....               | 291 |
| 19.5.1. Скорость изменения напряжений $u_{AK}$ и $u_{A2A1}$ .....    | 291 |
| 19.5.2. Максимальные значения напряжений $u_{AK}$ и $u_{A2A1}$ ..... | 293 |
| 19.5.3. Максимальное значение тока $i_A$ .....                       | 294 |
| 19.5.4. Скорость изменения тока $i_A$ .....                          | 294 |

## Глава 20

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Фотоэлементы</b> .....                                      | 295 |
| 20.1. Общие вопросы .....                                      | 295 |
| 20.1.1. Фотон. Электромагнитная волна .....                    | 295 |
| 20.1.2. Оптические величины и единицы измерения .....          | 295 |
| 20.1.3. Зрительное восприятие человека .....                   | 295 |
| 20.1.4. Инфракрасное излучение .....                           | 298 |
| 20.1.5. Оптоэлектронные эмиттеры или антенны (рис. 20.2) ..... | 298 |
| 20.1.6. Оптоэлектронные приемники (рис. 20.3) .....            | 298 |
| 20.2. Светодиоды .....                                         | 299 |
| 20.2.1. Условное обозначение. Световые величины. Модели .....  | 299 |
| 20.2.2. Типы проводимости .....                                | 300 |
| 20.3. Диоды LASER .....                                        | 302 |

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 20.4. Фотодиоды .....                          | 303 |
| 20.4.1. Условное обозначение (рис. 20.8) ..... | 303 |
| 20.4.2. Основная модель .....                  | 303 |
| 20.4.3. Динамическая модель .....              | 305 |
| 20.4.4. Рабочие режимы .....                   | 305 |
| 20.5. Фототранзисторы .....                    | 307 |
| 20.6. Солнечные батареи .....                  | 308 |
| 20.7. Оптроны .....                            | 308 |

## **Глава 21**

### **Операционные усилители .....** 310

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| 21.1. Условное обозначение. Структура .....                      | 310 |
| 21.2. Простейшая идеальная модель .....                          | 311 |
| 21.3. Ограничения и допущения .....                              | 312 |
| 21.3.1. Напряжение смещения. Токи поляризации .....              | 312 |
| 21.3.2. Частотные свойства .....                                 | 314 |
| 21.3.3. Полные входное и выходное сопротивления .....            | 316 |
| 21.3.4. Коэффициент подавления синфазной составляющей .....      | 318 |
| 21.3.5. Максимальная скорость изменения выходного напряжения ... | 318 |

## **Глава 22**

### **Аналоговые компараторы .....** 320

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 22.1. Условные обозначения. Описание .....        | 320 |
| 22.2. Элементарная модель. Идеальная модель ..... | 321 |
| 22.3. Ограничения и допущения .....               | 322 |

## **Глава 23**

### **Тепловые потери .....** 325

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 23.1. Электрические аналоги тепловой модели .....                                           | 325 |
| 23.2. Пути тепловых потерь .....                                                            | 326 |
| 23.3. Статическая тепловая модель (непрерывная) .....                                       | 326 |
| 23.4. Динамическая тепловая модель (переходная) .....                                       | 327 |
| 23.4.1. Последовательность импульсов мощности<br>в установившемся режиме .....              | 328 |
| 23.4.2. Единственный импульс мощности .....                                                 | 331 |
| 23.4.3. Наложение последовательности импульсов мощности на<br>постоянную составляющую ..... | 332 |
| 23.5. Составляющие охлаждения .....                                                         | 332 |

## Часть III. Электронные устройства

### Глава 24

#### Аналоговые фильтры ..... 334

24.1. Назначение. Идеальные фильтры ..... 334

24.2. Элементарные передаточные функции ..... 336

24.2.1. Передаточные функции первого порядка ..... 336

24.2.2. Передаточные функции второго порядка ..... 338

24.3. Аппроксимация идеальных аналоговых фильтров ..... 345

24.4. Эталонная частота. Неискажающий фильтр ..... 348

### Глава 25

#### Усиление и аналоговые операции ..... 351

25.1. Общие вопросы. Определения ..... 351

25.2. Усиление по напряжению ..... 355

25.3. Усиление по току ..... 358

25.4. Преобразование ток-напряжение (полное переходное сопротивление) ..... 359

25.5. Преобразователь напряжение – ток (полная переходная проводимость) ..... 360

25.6. Дифференциальное усиление ..... 362

25.6.1. Усилитель элементарных разностей ..... 363

25.6.2. Дифференциальный подстроечный усилитель ..... 365

25.6.3. Разделительный дифференциальный усилитель ..... 366

25.7. Усиление мощности ..... 367

25.7.1. Общие вопросы. Определения ..... 367

25.7.2. Усиление в режиме А ..... 368

25.7.3. Усиление в режиме В. Двухтактная схема ..... 369

25.7.4. Усиление в режиме АВ ..... 371

25.7.5. Усиление в режиме D ..... 371

25.8. Согласование сопротивления ..... 372

25.8.1. Введение ..... 372

25.8.2. Согласование на выходе ..... 372

25.8.3. Согласованные четырехполюсники ..... 373

25.9. Другие аналоговые операции с сигналами ..... 374

25.9.1. Сумматор ..... 374

25.9.2. Дифференцирующий усилитель ..... 376

25.9.3. Интегратор ..... 377

25.9.4. Обратные функции и операции ..... 378

25.9.5. Умножитель ..... 379

## **Глава 26**

### **Преобразование сигналов ..... 382**

- 26.1. Введение ..... 382
- 26.2. Дифференциальное исчисление. Чувствительность ..... 382
- 26.3. Приближенные расчеты методом малых приращений ..... 384
- 26.4. Ошибки. Погрешности. Допуски ..... 386
- 26.5. Калибровка ..... 389

## **Глава 27**

### **Замкнутые системы: обратная связь.**

#### **Генераторы колебаний ..... 392**

- 27.1. Принцип построения замкнутых систем. Обратная связь ..... 392
  - 27.1.1. Блок-схема с сумматором на входе (рис. 27.1) ..... 392
  - 27.1.2. Блок-схема с вычитающим устройством на входе ..... 396
- 27.2. Ввод обратной связи через усилитель ..... 397
  - 27.2.1. Эффекты обратной связи ..... 398
  - 27.2.2. Четыре структуры реакций ..... 398
- 27.3. Генераторы синусоидальных колебаний ..... 402
  - 27.3.1. Блок-схема генератора синусоидальных колебаний ..... 402
  - 27.3.2. Генераторы синусоидальных колебаний тока ..... 403

## **Глава 28**

### **Аналоговое сравнение ..... 409**

- 28.1. Сравнение сигналов ..... 409
- 28.2. Гистерезисное сравнение ..... 410
- 28.3. Сравнение в окне ..... 412

## **Глава 29**

### **Генераторы прямоугольных сигналов ..... 415**

- 29.1. Ждущий мультивибратор ..... 415
- 29.2. Несинхронизированный мультивибратор ..... 417
- 29.3. Запоздывание. Выдержка времени ..... 420
- 29.4. Практические соображения ..... 423
  - 29.4.1. RC-цепь при воздействии ступенчатым напряжением или током ..... 423
  - 29.4.2. Подключение конденсатора непосредственно к источнику тока ..... 424

**Глава 30****Цифро-аналоговое и аналого-цифровое преобразования..... 426**

- 30.1. Определения ..... 426
- 30.2. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) ..... 427
- 30.3. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)..... 428
- 30.4. Используемые в ЦАП и АЦП коды ..... 430
  - 30.4.1. Основные коды для униполярных преобразователей..... 430
  - 30.4.2. Основные коды для биполярных преобразователей ..... 432
- 30.5. Описания ЦАП И АЦП ..... 435
  - 30.5.1. Статические свойства..... 435
  - 30.5.2. Динамические характеристики ..... 437

**Часть IV. Силовая электроника****Глава 31****Неуправляемое выпрямление ..... 440**

- 31.1. Однофазное однополупериодное выпрямление ..... 441
  - 31.1.1. Активная нагрузка (рис. 31.1 и 31.2)..... 441
  - 31.1.2. Сглаживание выходного напряжения (рис. 31.3 и 31.4) ..... 442
  - 31.1.3. Сглаживание выходного тока (рис. 31.6 и 31.7) ..... 444
- 31.2. Однофазное двухполупериодное выпрямление ..... 445
  - 31.2.1. Активная нагрузка..... 445
  - 31.2.2. Сглаживание выходного напряжения (рис. 31.12)..... 447
  - 31.2.3. Сглаживание выходного тока (рис. 31.14 и 31.15) ..... 448
- 31.3. Однополупериодное трехфазное выпрямление ..... 449
  - 31.3.1. Резистивная нагрузка (рис. 31.16 и 31.17)..... 449
  - 31.3.2. Сглаживание выходного напряжения ..... 450
  - 31.3.3. Сглаживание выходного тока ..... 451
- 31.4. Мостовая схема трехфазного двухполупериодного выпрямления ... 451
  - 31.4.1. Резистивная нагрузка (рис. 31.18 и 31.19)..... 451
  - 31.4.2. Сглаживание выходного напряжения ..... 453
  - 31.4.3. Сглаживание выходного тока ..... 453
- 31.5. Основные характеристики схем выпрямления ..... 454

**Глава 32****Управляемые выпрямители ..... 455**

- 32.1. Однофазное однополупериодное выпрямление ..... 455
  - 32.1.1. Выпрямитель без разрядного диода..... 455
  - 32.1.2. Выпрямитель с разрядным диодом ..... 457
- 32.2. Однофазное двухполупериодное выпрямление ..... 459

|         |                                                      |     |
|---------|------------------------------------------------------|-----|
| 32.2.1. | Симметричный мост без разрядного диода.....          | 459 |
| 32.2.2. | Симметричная мостовая схема с разрядным диодом ..... | 467 |
| 32.2.3. | Смешанные мостовые схемы .....                       | 468 |
| 32.3.   | Трехфазное однополупериодное выпрямление.....        | 468 |
| 32.3.1. | Выпрямитель без разрядного диода.....                | 468 |
| 32.3.2. | Выпрямитель с разрядным диодом .....                 | 472 |
| 32.4.   | Трехфазное двухполупериодное выпрямление.....        | 473 |
| 32.4.1. | Симметричный мост без разрядного сопротивления ..... | 473 |
| 32.4.2. | Симметричный мост с разрядным диодом .....           | 477 |
| 32.4.3. | Смешанный мост .....                                 | 477 |
| 32.5.   | Коэффициент мощности выпрямителя .....               | 479 |
| 32.6.   | Критерии выбора.....                                 | 480 |

## Глава 33

### Преобразователи постоянного тока..... 482

|         |                                                                      |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 33.1.   | Последовательный вольтопонижающий регулятор .....                    | 482 |
| 33.1.1. | Принцип действия (рис. 33.2).....                                    | 482 |
| 33.1.2. | Последовательный регулятор со сглаживанием тока<br>(рис. 33.3) ..... | 483 |
| 33.2.   | Параллельный вольтоповышающий регулятор .....                        | 487 |
| 33.2.1. | Принцип действия (рис. 33.6).....                                    | 487 |
| 33.2.2. | Параллельный регулятор со сглаживанием напряжения ....               | 488 |
| 33.3.   | Регулятор с индуктивным накоплением.....                             | 493 |
| 33.4.   | Двухквadrантный или полумостовой регулятор .....                     | 495 |
| 33.4.1. | Принцип действия .....                                               | 495 |
| 33.4.2. | Двухквadrантный регулятор со сглаживанием тока.....                  | 496 |
| 33.5.   | Четырехквadrантный или мостовой регулятор .....                      | 497 |
| 33.5.1. | Принцип действия (рис. 33.17) .....                                  | 497 |
| 33.5.2. | Четырехквadrантный регулятор со сглаживанием тока ...                | 499 |

## Глава 34

### Источники импульсного питания..... 502

|         |                                                                             |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 34.1.   | Преобразователи без гальванической развязки.....                            | 502 |
| 34.1.1. | Вольтопонижающий преобразователь .....                                      | 502 |
| 34.1.2. | Вольтоповышающий преобразователь (рис. 34.4).....                           | 506 |
| 34.1.3. | Инвертирующий напряжение преобразователь (рис. 34.6) .                      | 509 |
| 34.2.   | Преобразователи с гальванической развязкой .....                            | 511 |
| 34.2.1. | Преобразователь с рекуперацией энергии (рис. 34.8).....                     | 511 |
| 34.2.2. | Преобразователь прямой передачи энергии<br>с гальванической развязкой ..... | 516 |



**Глава 35****Статические реле. Плавные регуляторы..... 521****35.1. Статические реле..... 521**

## 35.1.1. Состав — электронный прерыватель переменного тока.... 521

## 35.1.2. Принцип действия ..... 522

**35.2. Плавные регуляторы ..... 532**

## 35.2.1. Управление углом проводимости ..... 533

## 35.2.2. Управление изменением количества полных периодов..... 535

## 35.2.3. Трехфазные плавные регуляторы ..... 536

**Глава 36****Независимые инверторы ..... 537****36.1. Основной принцип построения..... 537****36.2. Мостовой инвертор напряжения..... 538**

## 36.2.1. Симметричное управление. Индуктивная нагрузка ..... 539

## 36.2.2. Управление со сдвигом. Индуктивная нагрузка ..... 541

## 36.2.3. Ступенчатое напряжение ..... 542

## 36.2.4. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) ..... 544

**36.3. Принцип построения трехфазных инверторов ..... 550****Часть V. Электрические машины****Глава 37****Энергетика ..... 551****37.1. Энергетический баланс ..... 551****37.2. Работа силы. Работа момента..... 553**

## 37.2.1. Работа силы ..... 553

## 37.2.2. Работа момента сил ..... 553

**37.3. Уравнение движения..... 555****37.4. Момент инерции твердого тела относительно оси вращения ... 556****37.5. Идеальные характеристики нагрузок..... 557****37.6. Сравнительная оценка двигателей ..... 559****Глава 38****Трансформаторы при синусоидальном питании  
и постоянной частоте ..... 560****38.1. Использование. Принципиальная схема. Режимы ..... 560****38.2. Идеальный трансформатор..... 561**

## 38.2.1. Режим трансформации ..... 561

## 38.2.2. Синусоидальный режим ..... 561

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 38.3. Реальный трансформатор .....      | 562 |
| 38.4. Трехфазный трансформатор.....     | 565 |
| 38.4.1. Устройство.....                 | 565 |
| 38.4.2. Группы соединений обмоток ..... | 565 |
| 38.4.3. КПД и модель.....               | 567 |

## Глава 39

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>Вращающиеся поля</b> ..... | 569 |
|-------------------------------|-----|

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 39.1. Вращающиеся машины переменного тока.....    | 569 |
| 39.1.1. Устройство.....                           | 569 |
| 39.1.2. Определения .....                         | 569 |
| 39.2. Распределение магнитного поля в зазоре..... | 570 |
| 39.2.1. Двухполюсная машина .....                 | 570 |
| 39.2.2. Многополюсная машина .....                | 572 |
| 39.3. Создание вращающегося поля .....            | 572 |
| 39.3.1. Эффект вращающихся полей.....             | 572 |
| 39.3.2. Вращение многополюсного ротора.....       | 573 |
| 39.3.3. Трехфазные многополюсные обмотки .....    | 574 |
| 39.4. Однофазная обмотка .....                    | 575 |
| 39.5. Двухфазная обмотка.....                     | 576 |

## Глава 40

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| <b>Трехфазные синхронные машины</b> ..... | 577 |
|-------------------------------------------|-----|

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 40.1. Устройство. Принцип действия. Возбуждение .....          | 577 |
| 40.2. Трехфазный генератор.....                                | 579 |
| 40.2.1. Холостой ход .....                                     | 579 |
| 40.2.2. Автономный генератор под нагрузкой .....               | 580 |
| 40.2.3. Эквивалентная модель приведенной к статору машины .... | 580 |
| 40.2.4. Баланс мощностей. КПД .....                            | 582 |
| 40.2.5. Подключение к сети .....                               | 583 |
| 40.3. Синхронный двигатель .....                               | 585 |
| 40.3.1. Упрощенная модель. Баланс мощностей и момент.....      | 585 |
| 40.3.2. Пуск. Регулирование скорости .....                     | 586 |
| 40.3.3. Ведомый полем синхронный двигатель.....                | 586 |
| 40.4. Бесконтактный двигатель .....                            | 587 |
| 40.4.1. Описание .....                                         | 587 |
| 40.4.2. Принцип действия двигателя с прямоугольными токами ..  | 587 |
| 40.4.3. Заключение .....                                       | 591 |
| 40.5. Использование синхронных машин .....                     | 591 |

**Глава 41****Трехфазные асинхронные двигатели ..... 592**

- 41.1. Устройство. Принцип действия. Скольжение..... 592
  - 41.1.1. Устройство..... 592
  - 41.1.2. Принцип действия ..... 593
  - 41.1.3. Скольжение..... 593
- 41.2. Баланс мощностей. КПД ..... 594
- 41.3. Модель и характеристики ..... 595
- 41.4. Пуск..... 597
- 41.5. Регулирование скорости..... 597
- 41.6. Обратимость. Торможение ..... 598
  - 41.6.1. Торможение..... 598
- 41.7. Асинхронный однофазный двигатель..... 598

**Глава 42****Шаговые двигатели ..... 599**

- 42.1. Принцип действия и определения ..... 599
  - 42.1.1. Принцип действия ..... 599
  - 42.1.2. Определения..... 599
  - 42.1.3. Двигатели с постоянными магнитами ..... 600
  - 42.1.4. Двигатели с переменной магнитной проницаемостью или реактивные (рис. 42.4) ..... 602
  - 42.1.5. Гибридные двигатели ..... 602
- 42.2. Свойства..... 603
- 42.3. Каскад мощности..... 603
- 42.4. Статический и динамический режимы ..... 604
  - 42.4.1. Статический режим ..... 604
  - 42.4.2. Динамический режим ..... 605
- 42.5. Использование ..... 606

**Глава 43****Машины постоянного тока ..... 607**

- 43.1. Основы ..... 607
  - 43.1.1. Принцип действия. Обратимость. Устройство..... 607
  - 43.1.2. ЭДС. Модель. Момент. Скорость ..... 609
- 43.2. Двигатель независимого возбуждения ..... 611
  - 43.2.1. Схема. Пуск. Регулирование скорости..... 611
  - 43.2.2. Баланс мощностей. КПД ..... 612
  - 43.2.3. Характеристики (табл. 43.2)..... 613
  - 43.2.4. Торможение..... 613

|                                  |                                                                                |            |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 43.3.                            | Двигатель последовательного возбуждения.....                                   | 613        |
| 43.3.1.                          | Схема. Пуск. Регулирование скорости.....                                       | 613        |
| 43.3.2.                          | Баланс мощностей. КПД. ....                                                    | 614        |
| 43.3.3.                          | Характеристики двигателя последовательного возбужде-<br>ния (табл. 43.2) ..... | 615        |
| 43.3.4.                          | Торможение.....                                                                | 616        |
| 43.3.5.                          | Универсальный двигатель .....                                                  | 616        |
| <b>Предметный указатель.....</b> |                                                                                | <b>617</b> |

## Предисловие к изданию на русском языке

Практическая деятельность общества и человека происходит в рамках своеобразного треугольника: материя – информация – энергия. Среди многообразия форм существования материи доминирующие позиции сегодня, в силу неисчерпаемых возможностей, принадлежат электрической энергии. Нельзя не отметить возрастающую сложность современных устройств различной мощности – от микроватт до многих мегаватт. Обслуживание такой техники, а тем более ее создание, требует высокого уровня знаний электротехники, наличия, можно сказать, определенного уровня электротехнической культуры.

Система подготовки инженерно-технических кадров в высшей школе России предусматривает для студентов электротехнических специальностей трехсеместровое изучение курса «Теоретические основы электротехники» с последующим изучением соответствующих профилирующих дисциплин: «Электрические машины», «Электроснабжение промышленных предприятий», «Промышленная электроника» и т. д. в зависимости от специализации. Для студентов технических специальностей, тесно не связанных с электротехникой, дается курс «Общей электротехники», в котором, кроме основ предмета, изучаются также прикладные вопросы, выбор которых зависит от специализации, т. е. с акцентом на электронику, на электромеханику, на электроснабжение и т. п. Этим обусловлено издание многих учебников и учебных пособий по общей электротехнике с основами тех или иных прикладных дисциплин. Изучение этой дисциплины начинается обычно со второго курса.

В настоящее время в российской системе подготовки специалистов идет процесс формирования трехуровневой системы образования: бакалавр – инженер – магистр. Во многих западных странах, в том числе и во Франции, эта система существует уже десятилетия, накоплен большой опыт. В соответствии с ней разрабатываются методические материалы, учебные программы и планы, издаются учебники и пособия по практическому усвоению теоретического материала. Одной из таких разработок и является предлагаемый учебник по общей электротехнике коллектива французских авторов.

Следует отметить, что кроме общетеоретических материалов от азов электростатики до сложных вопросов анализа динамики электрических цепей в прикладной части учебника ярко представлена тема электроники во всем ее многообразии. Особенностью учебника является стремление авторов совместить формальную строгость изложения с прозрачностью толкования сложных вопросов. В учебнике много расчетов, сделанных

на основе излагаемого теоретического материала. В свою очередь, теоретическая часть позволяет, после знакомства с основами фундаментальных выводов и правил, продолжить совершенствование знаний. Так, например, раздел, посвященный периодическим процессам, излагается в объеме, достаточном для практического использования. Интересные выводы завершаются формулой Бесселя – Парсеваля, которая может быть эффективно использована при изучении энергетических процессов в электротехнических устройствах. Далее авторы излагают физический смысл рассмотренных математических преобразований.

Разумеется, учебник не универсален. Его нельзя «в чистом виде» применять в учебном процессе «типового» учебного заведения. Но его содержание может факультативно использоваться в учебном процессе как студентами, так и преподавателями. Масштаб использования учебника, конечно, будет определяться учебной программой или преподавателем. Книга представляет практический интерес и как методический материал системы многоступенчатой подготовки специалистов, а также будет полезна для самостоятельной работы над материалом.

к. т. н. В. Н. Грасевич

# Предисловие

Этот труд представляет собой единство справочных материалов и методов электротехники, излагаемых в 43-х главах, тематически разделенных на 5 частей:

- электричество и его переменные (физические явления, законы электричества, синусоидальные и периодические процессы, частотные и временные отклики и т. д.);
- электронные компоненты (от сопротивлений до операционных усилителей, индуктивно связанные катушки, тиристоры и фотоэлементы, их модели и предельные свойства, тепловое рассеяние);
- электронные устройства (фильтры, усилители, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи и т. д.);
- силовая электроника (выпрямители, преобразователи постоянного тока, импульсные источники питания, плавные регуляторы, инверторы);
- электрические машины (трансформаторы, двигатели: синхронные, асинхронные, шаговые, постоянного тока).

Многочисленные примеры приводятся в форме вопросов-ответов.

Учебник предназначен для студентов, в том числе после получения степени бакалавра. Он обеспечивает связь знаний среднего и высшего образований. Возможными являются многие уровни изучения. Многие формулировки воспринимаются к окончанию среднего и к началу первого цикла специального образования; прочие — в последующем.

Этот труд адресован:

- студентам институтов технических университетов, бакалаврам, учащимся подготовительных курсов, школ инженеров, а также специализирующимся по электротехнике, электронике, промышленной информатике;
- вольным слушателям, для которых самостоятельное образование является необходимостью;
- действующим профессионалам-исследователям моделей и методов.

Авторы

## Величины. Единицы. Наименования в СИ

| Величина                         |                                               | Единица          |                            |
|----------------------------------|-----------------------------------------------|------------------|----------------------------|
| Обозначение                      | Название                                      | Обозначение      | Наименование               |
| a                                | Ускорение                                     | м/с <sup>2</sup> | Метр на секунду в квадрате |
| B                                | Магнитная индукция                            | Тл               | Тесла                      |
| C                                | Электрическая емкость                         | Ф                | Фарада                     |
| C <sub>Тн</sub> , C <sub>θ</sub> | Термическая емкость                           | Дж/К             | Джоуль на кельвин          |
| E                                | Напряженность электрического поля             | В/м              | Вольт на метр              |
| f                                | Частота                                       | Гц               | Герц                       |
| F                                | Сила                                          | Н                | Ньютон                     |
| F <sub>м</sub>                   | Магнитодвижущая сила                          | А                | Ампер                      |
| ε                                | Диэлектрическая проницаемость                 | Ф/м              | Фарада на метр             |
| G                                | Электрическая проводимость                    | См               | Сименс                     |
| H                                | Напряженность магнитного поля                 | А/м              | Ампер на метр              |
| i, I                             | Электрический ток                             | А                | Ампер                      |
| ℓ, L                             | Длина                                         | м                | Метр                       |
| L                                | Собственная индуктивность                     | Гн               | Генри                      |
| m                                | Масса                                         | кг               | Килограмм                  |
| μ                                | Магнитная проницаемость                       | Гн/м             | Генри на метр              |
| M                                | Момент силы                                   | Нм               | Ньютонметр                 |
| M                                | Взаимная индуктивность                        | Гн               | Генри                      |
| p, P                             | Мощность, тепловой поток                      | Вт               | Ватт                       |
| q, Q                             | Количество электричества, электрический заряд | Кл               | Кулон                      |
| Q                                | Реактивная мощность                           | вар              | Вольт-ампер реактивный     |
| r, R                             | Сопротивление электрическое                   | Ом               | Ом                         |
| R <sub>Тн</sub> , R <sub>θ</sub> | Сопротивление термическое                     | К/Вт             | Кельвин на ватт            |
| S                                | Кажущаяся мощность                            | ВА               | Вольт-ампер                |
| t                                | Время                                         | с                | Секунда                    |



|      |                                          |       |                            |
|------|------------------------------------------|-------|----------------------------|
| T, θ | Температура                              | K, °C | Кельвин,<br>градус Цельсия |
| u, U | Разность потенциа-<br>лов, напряжение    | B     | Вольт                      |
| v, V | Электрический по-<br>тенциал             | B     | Вольт                      |
| v    | Скорость                                 | м/с   | Метр в секунду             |
| w, W | Энергия, работа, ко-<br>личество теплоты | Дж    | Джоуль                     |
| α    | Угловое ускорение                        | рад/с | РадIAN в секунду           |
| φ, Φ | Поток магнитной ин-<br>дукции            | Вб    | Вебер                      |
| λ    | Длина волны                              | м     | Метр                       |
| ω    | Угловая скорость                         | рад/с | РадIAN в секунду           |

*Приставки к наименованиям единиц в системе СИ*

| Приставка |          | Множитель | Приставка |          | Множитель  |
|-----------|----------|-----------|-----------|----------|------------|
| Символ    | Название |           | Символ    | Название |            |
| Э         | экса     | $10^{18}$ | д         | деци     | $10^{-1}$  |
| П         | пента    | $10^{15}$ | с         | сантИ    | $10^{-2}$  |
| Т         | тера     | $10^{12}$ | м         | мили     | $10^{-3}$  |
| Г         | гига     | $10^9$    | мк        | микро    | $10^{-6}$  |
| М         | мега     | $10^6$    | н         | нано     | $10^{-9}$  |
| к         | кило     | $10^3$    | п         | пико     | $10^{-12}$ |
| г         | гекто    | $10^2$    | ф         | фемто    | $10^{-15}$ |
| да        | дека     | 10        | а         | атто     | $10^{-18}$ |

**Децибелы.** Отношение двух величин можно выразить либо простым частным, либо логарифмом этого частного. Чаще всего используют десятичный логарифм, обозначаемый как  $\log_{10}$  или проще  $\log$ .

Отношение мощностей, выраженное в беллах<sup>1</sup> (Б), определяется как:

$$\log \frac{P_2}{P_1}.$$

Отношение мощностей, выраженное в децибелах (дБ), определяется как:

$$10 \log \frac{P_2}{P_1},$$

где 1 Б = 10 дБ.

---

<sup>1</sup>Graham Bell (1847–1922).

Полагая, что  $p_2$  и  $p_1$  являются мощностями рассеяния в двух сопротивлениях, равных  $R_0$ , получим:

$$p_1 = \frac{u_1^2}{R_0} = R_0 i_1^2 \quad \text{и} \quad p_2 = \frac{u_2^2}{R_0} = R_0 i_2^2,$$

откуда следует:

$$10 \log \frac{p_2}{p_1} = 20 \log \frac{u_2}{u_1} = 20 \log \frac{i_2}{i_1}.$$

Следовательно, обобщая, получим отношение напряжений  $u_2$  к  $u_1$  и отношение токов  $i_2$  к  $i_1$ , выраженные в децибелах, в виде:

$$20 \log \frac{u_2}{u_1} \quad \text{и} \quad 20 \log \frac{i_2}{i_1}.$$

Предшествующие определения дают относительные уровни  $p_2$  по отношению к  $p_1$ ,  $u_2$  по отношению к  $u_1$ ,  $i_2$  по отношению к  $i_1$ . Для получения абсолютных уровней следует условно зафиксировать эталонное значение.

Для эталонной мощности 1 Вт мощность  $p = p(t)$ , выраженная в децибелах по отношению к 1 Вт (дБ Вт), определится как

$$p_{(\text{дБ Вт})} = 10 \log \frac{p_{(\text{Вт})}}{1_{(\text{Вт})}} = 10 \log p_{(\text{Вт})}.$$

Для эталонной мощности 1 Вт мощность  $p = p(t)$ , выраженная в децибелах по отношению к 1 Вт (дБ Вт), определится как

$$p_{(\text{дБ мВт})} = 10 \log \frac{p_{(\text{Вт})}}{10^{-3}_{(\text{Вт})}} = 10 \log \frac{p_{(\text{мВт})}}{1_{(\text{мВт})}} = 10 \log p_{(\text{мВт})}.$$

Для эталонного напряжения 1 В напряжение  $u = u(t)$ , выраженное в децибелах по отношению к 1 В (дБ В), определится выражением:

$$u_{(\text{дБ В})} = 200 \log \frac{u_{(\text{В})}}{1_{(\text{В})}} = 20 \log u_{(\text{В})}.$$

Соотношение между (дБ мВт) и (дБ В). Пусть  $u$  — напряжение на зажимах сопротивления  $R_0$ , рассеиваемая мощность составит  $p = u^2/R_0$ , откуда

$$p_{(\text{дБ мВт})} = u_{(\text{дБ В})} - 10 \log \frac{R_0}{1000} \Rightarrow P_{\text{ср } (\text{дБ мВт})} = U_{\text{д } (\text{дБ В})} - 10 \log \frac{R_0}{1000},$$

где  $P_{\text{ср } (\text{дБ мВт})}$  — средняя мощность в децибелах по отношению к 1 мВт;  $U_{\text{д } (\text{дБ В})}$  — действующее значение напряжения в децибелах по отношению к 1 В.

$$\text{Для } R_0 = 600 \text{ Ом} \quad \Rightarrow \quad p_{(\text{дБ мВт})} \approx u_{(\text{дБ В})} + 2,22;$$

$$R_0 = 50 \text{ Ом} \quad \Rightarrow \quad p_{(\text{дБ мВт})} \approx u_{(\text{дБ В})} + 13,01.$$

Для напряжения, отличного от  $\sqrt{0,6} \text{ В} \approx 0,775 \text{ В}$ , напряжение  $u = u(t)$ , выраженное по отношению к нему в децибелах, составит:

$$u_{(\text{дБ } u)} = 20 \log \frac{u_{(\text{В})}}{\sqrt{0,6}_{(\text{В})}} \approx 20 \log \frac{u_{(\text{В})}}{0,775_{(\text{В})}}.$$

**Примечание.** В телефонии полное эталонное сопротивление исторически было определено в Европе как чистое сопротивление в 600 Ом (в США 900 Ом), которое грубо соответствует среднему полному сопротивлению абонентской линии в частотной полосе пропускания от 300 до 3400 Гц. Тогда для эталонной мощности 1 мВт получим значение действующего эталонного напряжения  $\sqrt{0,6} \approx 0,775 \text{ В}$ , откуда следует определение децибел напряжения.

Соотношение между (дБ мВт) и (дБ  $u$ ). Пусть  $u$  — напряжение на зажимах сопротивления  $R$ , мощность рассеяния составляет  $p = u^2/R$ , откуда

$$P_{(\text{дБ мВт})} = u_{(\text{дБ } u)} - 10 \log \frac{R}{600} \quad \Rightarrow \quad P_{\text{ср } (\text{дБ мВт})} = U_{\text{д}} - 10 \log \frac{R}{600}.$$

$$\begin{aligned} \text{Для } R_0 = 600 \text{ Ом} & \Rightarrow P_{(\text{дБ мВт})} = u_{(\text{дБ } u)}; \\ R_0 = 150 \text{ Ом} & \Rightarrow P_{(\text{дБ мВт})} \approx u_{(\text{дБ } u)} + 6,02. \end{aligned}$$

Соотношение между (дБ  $u$ ) и (дБ В):

$$u_{(\text{дБ } u)} \approx u_{(\text{дБ В})} + 2,22.$$

## **ЧАСТЬ I**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ЕГО ПЕРЕМЕННЫЕ**

## **ГЛАВА I**

### **ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО?**

#### **1.1. Частицы. Электрические заряды и носители зарядов**

(Развитие темы см. гл. 3. Электростатика)

##### **1.1.1. Частицы и электрические заряды**

После открытия электрона стало очевидным существование многих частиц: протонов и нейтронов, составляющих атомное ядро; фотонов, составляющих свечение всего исходящего при расщеплении атомного ядра: нейтрино, мюонов, каонов, глюонов и т.д. (их около сотни).

Таблица 1.1. Частицы и заряды

| Частицы       | Массы                                          | Электрические заряды, Кл                            | Примечания                                                                                                                    |
|---------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Электрон<br>⊖ | $m_e \approx 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  | $q_e = -e \approx -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ | Масса очень мала. Электрический заряд отрицательный.                                                                          |
| Протон<br>⊕   | $m_p \approx 1,6726 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ | $q_p = +e \approx +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ | Масса в 1836,15 раз больше массы электрона. Электрический заряд положительный.                                                |
| Нейтрон<br>○  | $m_n \approx 1,6749 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ | Электрического заряда нет                           | Он обеспечивает устойчивость атомных ядер; имеется во всех ядрах, кроме водорода. Масса в 1838,68 раз больше массы электрона. |
| Фотон<br>⊙    | Массы нет                                      | Электрического заряда нет                           | Частица света. Перемещается в вакууме со скоростью $c \approx 299\,792 \text{ км/час}$ .                                      |

### 1.1.2. Электростатические силы. Закон Кулона

• **Притяжение и отталкивание двух электрических зарядов** (рис. 1.1).

1. Два заряда одинакового знака отталкиваются.
2. Два заряда противоположных знаков притягиваются.

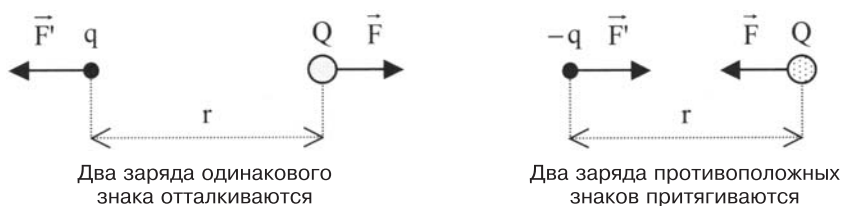


Рис. 1.1. Притяжение и отталкивание двух электрических зарядов

• **Модуль сил притяжения и отталкивания.** Выраженный в ньютонах (Н) он определяется *законом Кулона*:

$$F = F' = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{qQ}{r^2} \text{ с единицами измерения } Н = \frac{1}{\Phi/\text{м}} \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2} = \frac{\text{Кл}^2}{\Phi \cdot \text{м}},$$

где  $\epsilon$  — абсолютная проницаемость среды. В вакууме (и в почти сухом воздухе)

$$\epsilon = \epsilon_0 \approx 8,8541878 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

**Примечание.** Теория распространения электромагнитных волн показывает, что константы  $\epsilon_0$  (*электрическая проницаемость вакуума*),  $\mu_0$  (*магнитная проницаемость вакуума*) и  $c$  (*скорость света в вакууме*) связаны соотношением  $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$ . С тех пор как скорость света в вакууме стала эталоном, электрическая проницаемость вакуума стала константой, точно определяемой как

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2},$$

где  $c = 299\,792\,458$  м/с и  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup> (или Гн/м).

### 1.1.3. Электрическое поле

Сила  $\vec{F}$ , действующая на заряд  $Q$ , является следствием действия заряда  $q$  на расстоянии. Такая интерпретация приводит к новой записи *закона Кулона*:

$$\vec{F} = Q\vec{E} \text{ с единицами измерения } Н = \text{Кл} \frac{\text{В}}{\text{м}},$$

где *напряженность*  $E$  вектора электрического поля  $\vec{E}$  определяется как

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r^2} \text{ с единицами измерения } \text{В/м} = \frac{1}{\Phi/\text{м}} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Кл}}{\Phi \cdot \text{м}}.$$

Заряд  $Q$  позволяет определить наличие электрического поля (рис. 1.2).

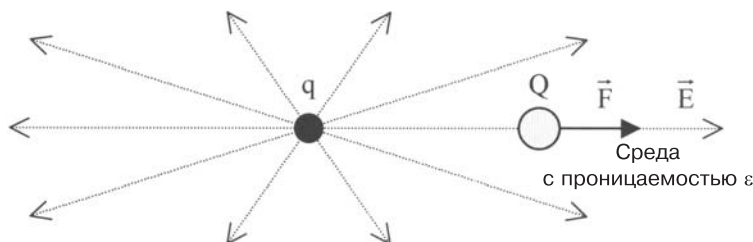


Рис. 1.2. Электрическое поле заряда  $q$

## 1.2. Явление проводимости. Электрический ток

### 1.2.1. Электрический ток

• **Электрический ток.** Электрические заряды под воздействием электрического поля испытывают действие электростатических сил, они перемещаются. Поток зарядов через поверхность  $S$  называется *электрическим током*. Его обозначают как  $i$ , единица измерения — ампер (А).

$$i = \frac{dq}{dt} \text{ с единицами измерения } А = \frac{\text{Кл}}{\text{с}}.$$

**Примечание.** Если поток зарядов постоянен, имеем  $I = \Delta Q / \Delta t$ .

• **Плотность тока.** Эта фундаментальная величина определяет значение тока через единицу поверхности:

$$J = \frac{I}{S} \text{ с единицами измерения } \text{А/м}^2.$$

**Вопрос.** Зная, что голый медный проводник выдерживает плотность тока около  $J = 5 \text{ А/мм}^2$ , выбрать минимальное сечение проводника  $S_{\text{мин}}$ , необходимое для питания электроплиты, потребляющей номинальный ток  $I_{\text{ном}} = 30 \text{ А}$ .

**Ответ.**  $S_{\text{мин}} = I_{\text{ном}} / J = 6 \text{ мм}^2$ .

• **Скорость зарядов. Закон Ома.** В вакууме под действием электростатических сил заряды достигают обычно скоростей порядка нескольких тысяч м/с (катодные трубки).

Из-за трудностей проложить себе путь между атомами или молекулами в материи носители зарядов, подверженные тепловым колебаниям, быстро достигают очень маленькой предельной скорости в несколько мм/с (в меди). Закон Ома объясняет наличие такой скорости, используя вектор плотности тока  $\vec{j}$ .

В микроскопической форме ( $\vec{j}$  — вектор плотности тока;  $\sigma$  — проводимость материала):

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \text{ с единицами измерения } \text{А/м}^2 = (\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1})(\text{В/м}).$$

В макроскопической форме ( $I$  — ток,  $U$  — напряжение на зажимах проводника,  $\ell$  — его длина,  $S$  — его сечение,  $\rho$  — удельное сопротивление материала):

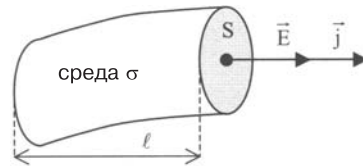
$$I = SJ = S\sigma E = S\sigma \frac{U}{\ell} = \frac{S\sigma}{\ell} U = \frac{U}{R}.$$

Тогда закон Ома запишется в виде:

$$U = RI$$

$$\text{с единицами измерения } \text{В} = \text{Ом} \cdot \text{А} \text{ при } R = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell}{S} = \rho \frac{\ell}{S}.$$

**Примечание.** Чтобы существовал ток  $I$ , среда должна обладать свободными зарядами (проводимость  $\sigma$ ), подверженными воздействию со стороны поля  $\vec{E}$  (рис. 1.3).



**Рис. 1.3.** Электрическая проводимость

### 1.2.2. Свободные и связанные заряды

Атомы (рис. 1.4) представляют собой ядро, окруженное электронным облаком.

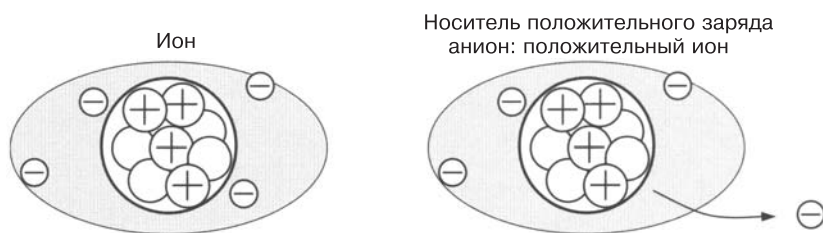


Рис. 1.4. Атом-ион

Чтобы получить электрический заряд, нужно от атома отделить один или несколько электронов. Это может быть реализовано несколькими способами:

1. Посредством внешней энергии.

- Механически — трением, например, воздуха о кузов автомобиля.
- Электрически — сильное электрическое поле может извлекать электрон из атома (диод Зенера).
- Термически — тепловое движение атомов и молекул в газе может вызвать их ионизацию (плазма).

2. Сближением атомов (кристаллы, поликристаллы). Хотя кристаллические решетки обязаны силой своего сцепления объединению их электронов, они не всегда являются проводниками. Различают проводники, полупроводники и изоляторы.

### 1.2.3. Электрические среды

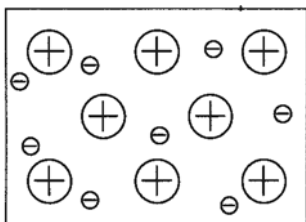


Рис. 1.5. Проводники. Поток свободных электронов в фиксированной ионной решетке

• **Проводники.** Большое количество электронов свободно для перемещения внутри металла (рис. 1.5).

Проводимость металла очень велика. Эта проводимость выражается в функции подвижности  $\mu$  носителей и их концентрации  $n$ .

$$\sigma = ne\mu$$

с единицами измерения

$$\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1} = \frac{1}{\text{м}^3} \text{Кл} \frac{\text{м}^2}{\text{Вс}} = \frac{1}{\text{м}} \frac{\text{Кл}}{\text{Вс}} = \frac{1}{\text{м}} \frac{\text{А}}{\text{В}}.$$



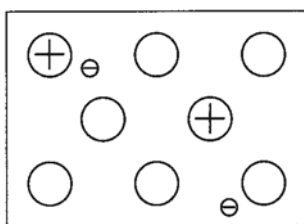
**Пример 1.2.1.** Проводимость меди составляет  $\sigma \approx 59 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ .

• **Полупроводники.** Это монокристаллы высокой чистоты, в которых только некоторые атомы освобождают один электрон при температуре окружающей среды ( $T \approx 300 \text{ К}$ ). Обычно один электрон более чем на 100 миллионов атомов (рис. 1.6). Атомы полупроводниковых кристаллов принадлежат IV колонке периодической таблицы элементов.

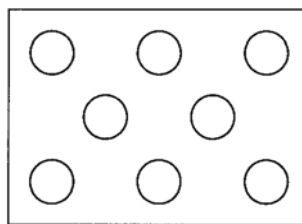
Проводимость обеспечивается электронами (отрицательные носители) и положительными ионами одновременно. Ионы при этом как бы перемещаются, поскольку вследствие постоянного теплового движения электроны покидают атом, образуя ион и т. д. Эти положительные ионы называются *дырками* (положительные носители). Проводимость полупроводников представляет собой сумму двух проводимостей:

- Проводимость положительными носителями (слабая)  $\sigma_{\text{п}}$ : дырки перемещаются труднее, чем электроны.
- Электронная проводимость (более сильная)  $\sigma_{\text{е}}$ .

По большому счету проводимость намного слабее, чем у металлов, так как носителей зарядов меньше (число положительных зарядов такое же, как и отрицательных).



**Рис. 1.6.** Полупроводник. Свободный электронный и ионный поток в фиксированной атомной решетке



**Рис. 1.7.** Диэлектрики. Свободных электронов в атомной решетке нет

**Вопрос.** Для чистого кремния при температуре окружающей среды ( $T \approx 300 \text{ К}$ ) имеем:  $\mu_{\text{е}} \approx 0,12 \text{ м}^2/\text{Вс}$ ,  $\mu_{\text{п}} \approx 0,05 \text{ м}^2/\text{Вс}$ ,  $n_{\text{п}} = n_{\text{е}} = n_{\text{i}} \approx 1,5 \text{ носителей}/\text{м}^3$ . Рассчитать проводимость.

**Ответ.**  $\sigma = \sigma_{\text{е}} + \sigma_{\text{п}} = n_{\text{е}}e\mu_{\text{е}} + n_{\text{п}}e\mu_{\text{п}} \approx 4,08 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ .

• **Диэлектрики.** В них нет свободных электронов (рис. 1.7) при температуре окружающей среды ( $T \approx 300 \text{ К}$ ). Проводимость практически нулевая.

### 1.2.4. Влияние температуры

• **Проводники.** Повышение теплового движения с ростом температуры затрудняет движение электрических зарядов. Поэтому с ростом температуры проводимость проводников уменьшается и определяется как

$$\sigma = \sigma_0(1 + \alpha\theta),$$

где  $\sigma_0$  — проводимость при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta$  — температура в  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$  — отрицательный температурный коэффициент в  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

• **Полупроводники.** Напротив, в полупроводниковых материалах при температуре окружающей среды тепловое движение имеет иное последствие. Оно создает новые свободные заряды (пары электрон-дырка). Поэтому при средней температуре проявляется свойство, обратное свойству проводников: проводимость повышается экспоненциально с ростом температуры.

- У германия проводимость удваивается примерно каждые  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- У кремния проводимость удваивается примерно каждые  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Такое повышение проводимости происходит экспоненциально и преобразует эти полупроводники в проводники приблизительно при  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  для германия и  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  для кремния. Диоды, транзисторы и интегральные схемы при этих температурах теряют свои специфические свойства.

### 1.2.5. Частотные свойства.

#### Поверхностный эффект в проводнике

При переменном токе электромагнитные явления вытесняют заряды с центра проводника. Это называется *поверхностным эффектом*. Ток в проводнике становится неоднородным. На периферии он больше, чем в центре (рис. 1.8).

Глубина проникновения тока определяется как

$$e = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\mu_r f\sigma}},$$

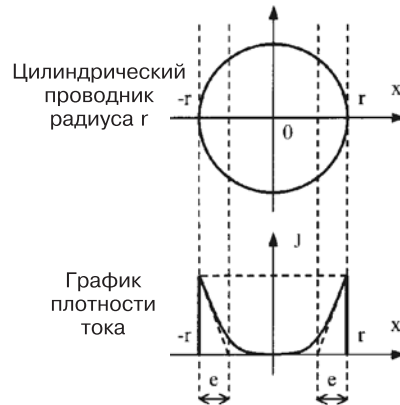
где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ Гн/м}$  — магнитная проницаемость вакуума;  $\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость материала (безразмерная);  $\sigma$ ,  $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  — проводимость материала;  $f$ , Гц — частота.

**Вопрос.** Рассчитать глубину проникновения тока в медном проводнике: ( $\sigma \approx 59 \cdot 10^6\text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  и  $\mu_r \approx 1$ ) при  $50\text{ Гц}$ .

**Ответ.** По формуле  $e \approx 9,2\text{ мм}$ . Для ограничения этого эффекта используют многопроволочные проводники, для передачи энергии используют

многокабельные линии. Кабели высокой надёжности также многопроводочные.

Рис. 1.8. Поверхностный эффект в проводнике

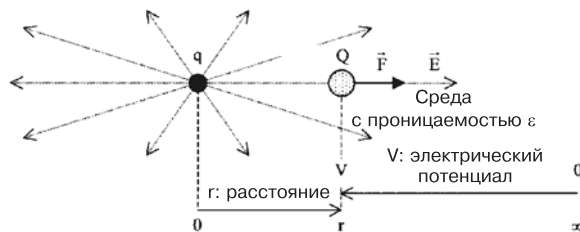


**Примечание.** С ростом частоты глубина проникновения уменьшается.

### 1.3. Электрический потенциал заряда

(Развитие темы см. гл. 3)

Рис. 1.9. Электрический потенциал



#### 1.3.1. Цель

Рассматриваемый заряд  $q$  (рис. 1.9) создает электрическое поле, вектор напряженности которого  $\vec{E}$ . Для упрощения он заменяется скалярной величиной, связанной с работой, которую следует выполнить для переноса пробного заряда  $Q$  из бесконечности на расстояние  $r$  от рассматриваемого заряда  $q$ . Эта величина называется *электрическим потенциалом* и обозначается  $V$ .

**Примечание.** Соответственно определению потенциал на бесконечном расстоянии равен нулю:  $V(\infty) = 0$ .

### 1.3.2. Работа при переносе заряда $Q$ на расстояние $r$ от заряда $q$

Элементарная работа  $dW$  при переносе заряда  $Q$  из расстояния  $r$  в  $(r-dr)$ . При этом предполагается постоянство силы.

$$dW = -Fdr = -QEdr \text{ с единицами измерения } Дж = Н \cdot м = Кл \frac{В}{м}.$$

Работа  $W_{A \rightarrow B}$  при переносе заряда  $Q$  из точки  $A$  в точку  $B$ . Интегрируя в пределах от  $A$  до  $B$ , получим:

$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B E(r)dr \text{ с единицами измерения } Дж = Кл \frac{В}{м}.$$

Полагая  $dV = -E(r)dr$ , интеграл запишется в виде:

$$W_{A \rightarrow B} = Q \int_A^B dV = Q(V_B - V_A) \text{ с единицами измерения } Дж = Кл \cdot В.$$

Работа  $W_{\infty \rightarrow M}$  при переносе заряда  $Q$  из бесконечности на расстояние  $M$ .

$$W_{\infty \rightarrow M} = Q \int_{\infty}^M dV = Q(V_M - V_{\infty}) = QV_M$$

с единицами измерения  $Дж = Кл \cdot В$ .

### 1.3.3. Электрический потенциал

Из предыдущих результатов следует:

$$V_M = \frac{W_{\infty \rightarrow M}}{Q} \text{ с единицами измерения } В = Дж/Кл.$$

Функция  $V_M(r)$  определяет работу при переносе единицы заряда из бесконечности в точку  $M$  (рис. 1.10). Величину  $V_M$  называют *электрическим потенциалом* точки  $M$ , созданным рассматриваемым зарядом  $q$ .

#### **Примечания.**

- Как только заряд освободится от приложенного к нему возмущения, он, естественно, вернется в бесконечность, затратив накопленную энергию. Его потенциал снизится до нуля.
- Электрический потенциал  $V_M(r)$  является величиной, отражающей значение потенциальной энергии, накопленной зарядом  $Q$ , когда он располагается на расстоянии  $r$  от заряда  $q$ . Она не зависит от заряда  $Q$ ! Это фундаментальное энергетическое понятие.

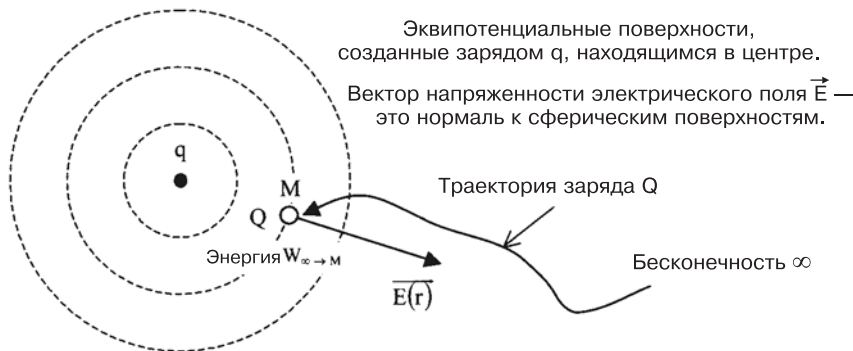


Рис. 1.10. Работа электрической силы

### 1.3.4. Разность электрических потенциалов. Электрическое напряжение

Протекание тока в цепи может быть только путем энергетического обмена с внешней средой (рис. 1.11). Таким образом, носители зарядов способны передать энергию  $Q(V_B - V_A)$  во внешнюю среду. *Напряжение* определяется разностью потенциалов  $U_{BA} = V_B - V_A$ .

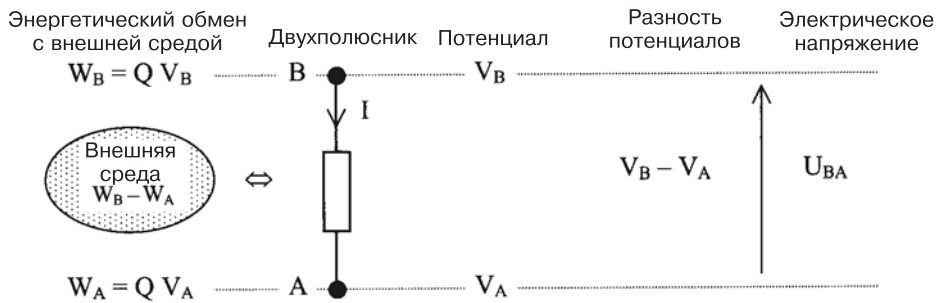


Рис. 1.11. Потенциал — разность потенциалов — напряжение

**Примечание.** Следует понимать, что при прохождении в электрической цепи носители заряда изменяют свой потенциал (энергию), обычно уменьшая.

## ГЛАВА 2

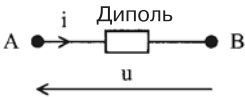
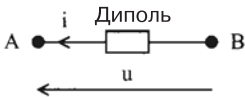
# ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

### 2.1. Двухполюсники

#### 2.1.1. Определение. Условности

*Двухполюсник* — это приемник или источник электрической энергии, способный преобразовать электрическую энергию в энергию различной природы (химическую, механическую, термическую ...) в режиме потребителя и обратно — в режиме источника. С внешней средой он связан зажимами А и В (табл. 2.1). Ток, входя через один из них, выходит через другой. Напряжение  $u$  и ток  $i$  — величины алгебраические.

Таблица 2.1. Условные приемник и генератор

| Условный приемник                                                                  | Условный генератор                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |
| Мощность (потребляемая, преобразуемая)<br>положительна: $ui > 0$                   | Мощность (генерируемая, выработанная)<br>положительна: $ui > 0$                     |

#### 2.1.2. Линейный двухполюсник. Линейная цепь

• **Линейный двухполюсник.** Двухполюсник, в котором  $u = f(i)$ , где  $i = g(u)$ , называется линейным, если, и только если, функция  $f$  или  $g$  линейна, т.е. такова, что

$$f(\alpha_1 i_1 + \alpha_2 i_2) = \alpha_1 f(i_1) + \alpha_2 f(i_2) \quad \text{или} \quad g(\lambda_1 u_1 + \lambda_2 u_2) = \lambda_1 g(u_1) + \lambda_2 g(u_2).$$

• **Линейная цепь.** Если все двухполюсники, составляющие электрическую цепь, линейны, то уравнение, позволяющее рассчитать выходную величину  $s = s(t)$  в функции входной  $e = e(t)$ , в общем случае является дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами типа:

$$a_n \frac{d^n s}{dt^n} + \dots + a_2 \frac{d^2 s}{dt^2} + a_1 \frac{ds}{dt} + a_0 s = b_m \frac{d^m e}{dt^m} + \dots + b_2 \frac{d^2 e}{dt^2} + b_1 \frac{de}{dt} + b_0 e \quad (m \leq n).$$

Тогда цепь считается линейной.

**Пример 2.1.1.** Мощность  $p = Ri^2$  не линейна, так как наличие квадратной функции является нелинейностью, ее производная  $dp/dt$  не является независимой от  $i$ .

### 2.1.3. Элементарные двухполюсники

#### а) Классификация двухполюсников

*Активный* двухполюсник — это двухполюсник, способный генерировать энергию. И напротив, *пассивный* двухполюсник не способен генерировать энергию.

Двухполюсник *симметричен*, когда

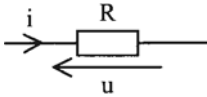
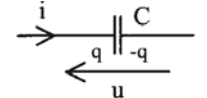
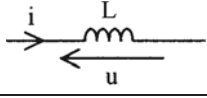
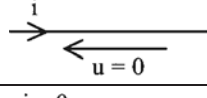
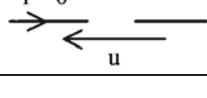
$$f(i) = -f(-i) \quad \text{или} \quad g(u) = -g(-u).$$

*Линейный* двухполюсник: см. § 2.1.2.

#### б) Пассивные двухполюсники

*Пассивные линейные элементы* (табл. 2.2). Обычно принимается соглашение приемника (направления  $u$  и  $i$  встречные), что исключает ошибки.

**Таблица 2.2.** Пассивные линейные двухполюсники в режиме потребителя

| Элемент                  | Обозначение на схемах                                                               | Символ и размерность             | Закон                 | Единицы измерения          |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Сопротивление (резистор) |  | $R$ — сопротивление в омах (Ом)  | $u = iR$              | $V = \text{Ом} \cdot A$    |
| Конденсатор              |  | $C$ — емкость в фарадах (Ф)      | $i = C \frac{du}{dt}$ | $A = \Phi \frac{B}{c}$     |
| Катушка индуктивности    |  | $L$ — индуктивность в генри (Гн) | $u = L \frac{di}{dt}$ | $V = \Gamma_H \frac{A}{c}$ |
| Короткое замыкание       |  |                                  | $\forall i, u = 0$    |                            |
| Разрыв цепи              |  |                                  | $\forall u, i = 0$    |                            |

#### Примечания.

- Согласно закону прохождение тока  $i$  в конденсаторе в течение времени  $dt$  вызывает изменение электрического напряжения, направленного встречно. Этот закон записывается в интегральной форме как

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i d\tau = \frac{1}{C} \int_0^t i d\tau + U_0, \quad \text{где} \quad U_0 = u \quad (t = 0).$$

- Согласно закону изменение тока  $i$  в линейной катушке индуктивности не происходит скачком. Изменение тока сопровождается появлением встречно направленного ему напряжения, препятствующего изменению тока. Это закон Ленца, который записывается в интегральной форме как

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u d\tau = \frac{1}{L} \int_0^t u d\tau + I_0, \quad \text{где} \quad I_0 = i \quad (t = 0).$$

- Энергетический аспект (см. гл. 12 и гл. 13).

#### • Пассивные нелинейные элементы.

**Пример 2.1.2.** Зависящее от напряжения сопротивление не является линейным двухполюсником. Описывающее его уравнение  $i = ku^n$  не является линейной функцией напряжения  $u$ , а его производная  $di/du$  зависит от напряжения  $u$ .

Диод (см. гл. 16) не является линейным двухполюсником. Описывающее его уравнение

$$i_D = I_S \left( e^{\frac{u_D}{U_{0T}}} - 1 \right)$$

не является линейной функцией напряжения  $u_D$ .

#### в) Активные двухполюсники

• **Источники** (табл. 2.3). Договоренность о режиме генератора или потребителя принимается в зависимости от рассматриваемой задачи.

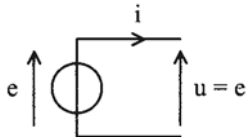
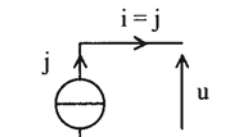
**Примечание.** Условные обозначения (табл. 2.3), используемые в эквивалентных схемах, всегда соответствуют «идеальным», а не «реальным» источникам. Часто реальный источник может быть смоделирован идеальным источником напряжения с последовательно включенным резистором. Это модель Тевенена. Его можно также смоделировать идеальным источником тока с параллельно включенным резистором. Это модель Нортона (см. § 2.2.4).

**Пример 2.1.3.** Автомобильная батарея является типичным примером «почти идеального» источника напряжения. Ее накапливаемый заряд измеряется обычно в ампер-часах ( $A \cdot \text{час}$ ). Таким образом, батарея на 12 В,



способная накопить заряд в  $60 \text{ А} \cdot \text{час}$ , может выдавать ток  $10 \text{ А}$  в течение 6 часов при напряжении  $12 \text{ В}$ .

Таблица 2.3. Источники

|                     | Обозначение                                                                       | Символ и размерность                                               | Закон              |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Источник напряжения |  | $e$ — электродвижущая сила (ЭДС)<br>$u$ — напряжение в вольтах (В) | $\forall i, u = e$ |
| Источник тока       |  | $j$ — ток в амперах (А)                                            | $\forall u, i = j$ |

**Вопрос.** Рассчитать энергию, поставляемую батареей в предыдущем примере.

**Ответ.**  $W = UIt = 12 \cdot 60 \cdot 3600 = 2592 \text{ кДж}$ .

**Примечание.** Практически «идеальных» источников тока не существует. Действительно, это предполагало бы, что можно накапливать энергию в форме тока постоянного значения  $j$ . Однако источник неизменного тока можно реализовать соединением источников энергии и двухполюсников. Это транзистор, соединенный с источником напряжения, или фотодиод, освещенный источником световой энергии.

• **Управляемый и неуправляемый источник.** *Управляемый*, или *зависимый, источник* — это источник, выходная величина которого зависит от другой величины схемы. В противном случае источник называется *неуправляемым* или *независимым*.

**Пример 2.1.4.** Выходной ток транзистора зависит от входной величины: тока базы биполярного транзистора и от напряжения решетка-источник полевого транзистора (рис. 2.1).

• **Линейный и нелинейный управляемый источник.** В *линейном управляемом источнике* выходная величина линейно зависит от управляющей величины. Если нет, источник *не линеен*.

#### 2.1.4. Принципиальные ограничения использования двухполюсника

Принципиальными электрическими и тепловыми ограничениями использования двухполюсников являются максимальное напряжение, максималь-

ный ток и максимальная мощность. Эти ограничения зависят от режима, который может быть: продолжительным, переменным, импульсным повторяющимся, импульсным неповторяющимся и т. д.

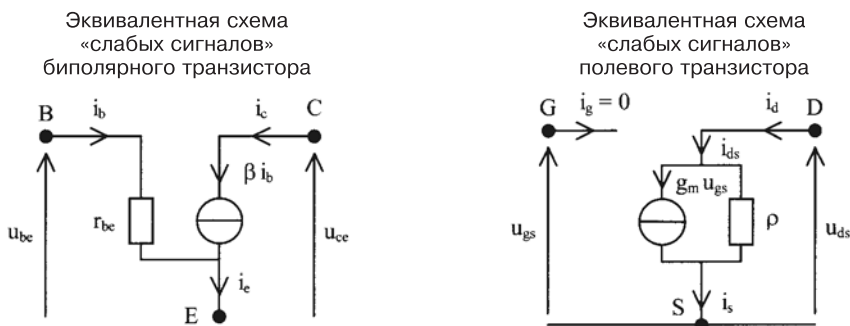


Рис. 2.1. Примеры управляемых источников

### 2.1.5. Характеристика двухполюсника

В зависимости от обстоятельств характеристика двухполюсника может быть снята в установившемся режиме (статическая характеристика), в переходном, импульсном режиме (динамическая характеристика) и т. д.

**Пример 2.1.5.** Здесь двухполюсник является только потребителем, так как потребляемая мощность может быть только положительной (рис. 2.2).

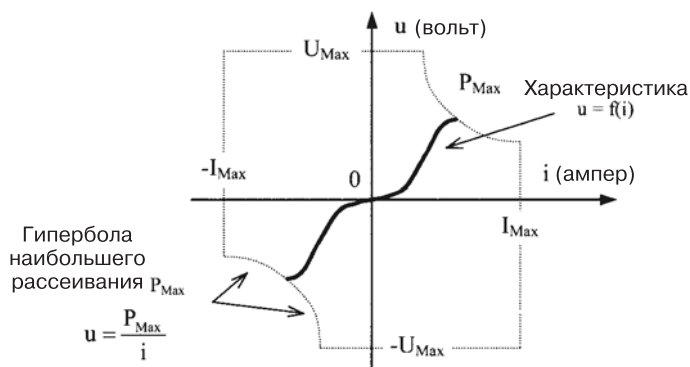
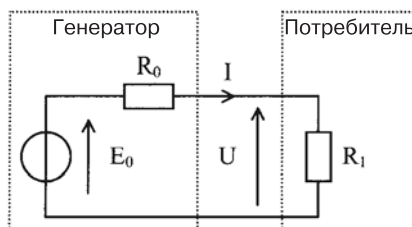


Рис. 2.2. Пример характеристики двухполюсника

### 2.1.6. Рабочая точка двухполюсника

**Пример 2.1.6.** Питание двухполюсника потребителя двухполюсником генератором фиксирует рабочую точку (рис. 2.3)

Рис. 2.3. Питание потребителя генератором

**Метод**

Рабочая точка определяется пересечением характеристик двухполюсников генератора и потребителя. Ее координатами являются напряжение на зажимах двухполюсников и ток  $I$ , протекающий в них.

1) Согласно общему подходу (линейные или нелинейные двухполюсники) нужно начертить характеристики в общей системе координат (рис. 2.4) или прибегнуть к методам информатики (например, моделированию).

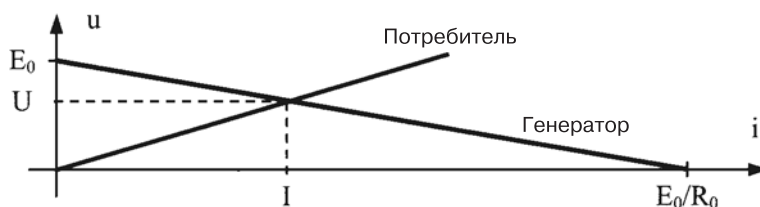


Рис. 2.4. Характеристики (пример на рис. 2.3)

2) Если двухполюсники потребителя и генератора линейны (как это имеет место на рис. 2.3 и 2.4), то решением проблемы будут:

- Уравнение генератора, называемое *уравнением прямой нагрузки*:  $u = E_0 - R_0 i$ .
- Уравнение потребителя:  $u = R_1 i$ .
- Система: 
$$\begin{cases} U = E_0 - R_0 I, \\ U = R_1 I, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U = \frac{R_1 E_0}{R_0 + R_1}, \\ I = \frac{E_0}{R_0 + R_1}. \end{cases}$$

**2.1.7. Соединение двухполюсников****а) Последовательное соединение двухполюсников (рис. 2.5)**

**Пример 2.1.7.** См. гл. 5, 11, 12, 13.

### Метод

При последовательном соединении двухполюсников по ним протекает один и тот же ток. Закон контурных токов позволяет записать

$$u_{\text{Tot}} = u_1 + u_2.$$

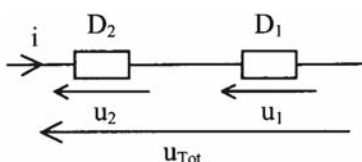


Рис. 2.5. Последовательное соединение

1) Обобщенным подходом (при линейных или нелинейных двухполюсниках) поэтапно получим характеристику эквивалентного двухполюсника

$$\begin{cases} u_1 = f_1(i), \\ u_2 = f_2(i), \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow u_{\text{Tot}} = u_1 + u_2 = f_1(i) + f_2(i).$$

2) При линейных двухполюсниках эквивалентный двухполюсник также линейный.

Тогда можно составить уравнение характеристики эквивалентного двухполюсника.

### б) Параллельное соединение двух двухполюсников (рис. 2.6)

### Метод

При параллельном соединении двухполюсников они питаются одним и тем же напряжением. По закону узлов

$$i_{\text{Tot}} = i_1 + i_2.$$

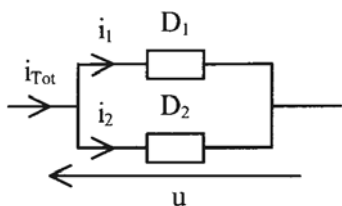


Рис. 2.6. Параллельное соединение

1) Обобщенным подходом (при линейных или нелинейных двухполюсниках) поэтапно получим характеристику эквивалентного двухполюсника

$$\begin{cases} i_1 = g_1(u), \\ i_2 = g_2(u), \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{\text{Tot}} = i_1 + i_2 = g_1(u) + g_2(u).$$

2) При линейных двухполюсниках эквивалентный двухполюсник также линейный.

Тогда можно составить уравнение характеристики эквивалентного двухполюсника.

**Примечание.** Часто записью  $D_1 // D_2$  обозначают параллельное соединение двух двухполюсников  $D_1$  и  $D_2$ .

**Пример 2.1.8.** См. гл. 5, 11, 12, 13.

## 2.2. Теоремы об электрических цепях

Следующие далее законы и теоремы приводятся для мгновенных значений переменных. Они могут быть обобщены в области использования комплексных чисел (см. гл. 5).

- Эти обобщения позволяют рассматривать все двухполюсники как линейные согласно определению (см. § 2.1.3), включая конденсаторы, катушки и т. д.
- Практически эти обобщения осуществляются в законах и теоремах заменой сопротивлений полными комплексными (комплексные числа) или операторными (преобразование Лапласа) сопротивлениями, а проводимостей — полными комплексными или операторными проводимостями. Соответственно теоремам будут приняты и замечания.

### 2.2.1. Законы Кирхгофа

**Внимание!** Токи и напряжения являются алгебраическими величинами. Положительные направления напряжения и тока, будучи неопределенным *априори*, задаются произвольно. Отрицательный результат просто указывает, что реальные направления тока или напряжения противоположны указанным стрелками на расчетной схеме.

• **Закон узлов**<sup>1</sup>. Его можно привести в двух эквивалентных формулировках.

1) Сумма токов, приходящих к узлу, равна сумме токов, отходящих от узла.

$$\sum i_{(\text{приходящих к узлу})} = \sum i_{(\text{отходящих от узла})}.$$

2) Алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.

*Правило (произвольное) принятия знака:* Знак «+» присваивается приходящим к узлу токам, а знак «−» отходящим от узла.

$$\sum i_n \text{ (в узле) } = 0.$$

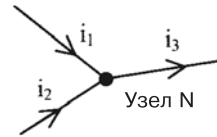


Рис. 2.7. Узел N

**Вопрос.** Записать закон узлов для узла N (рис. 2.7).

**Ответ.**  $i_1 + i_2 = i_3$  или  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ .

• **Закон контуров.** Его можно привести в двух эквивалентных формулировках.

<sup>1</sup>Во многих источниках закон узлов называют первым законом Кирхгофа, а закон контуров — вторым законом Кирхгофа. — *Прим. перев.*

1) Сумма напряжений в направлении обхода контура равна сумме напряжений в противоположном направлении.

$$\sum u_{(\text{направление обхода})} = \sum u_{(\text{встречное направление})}.$$

2) Алгебраическая сумма напряжений в контуре равна нулю.

$$\sum u_n (\text{в контуре}) = 0.$$

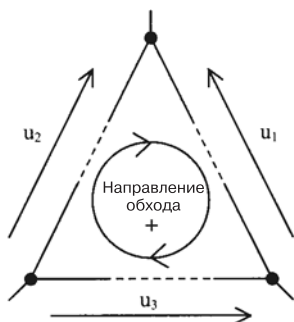


Рис. 2.8. Контур М

*Правило (произвольное) принятия знака:* знак «+» присваивается напряжениям, направление которых соответствует направлению обхода контура, а знак «−» соответствует встречному направлению.

**Вопрос.** Записать закон контуров для контура М (рис. 2.8).

**Ответ.**  $u_2 = u_1 + u_3$  или  $u_2 + (-u_1) + (-u_3) = 0$ .

#### Метод

Обычно начинают с выбора направления обхода контура.

**Внимание!** Законы узлов и законы контуров идентичны по своей форме, как *сумма мгновенных значений переменных*. Соответственно, и в случае периодических переменных эти законы справедливы также для средних значений переменных, НО НЕ для действующих значений и НЕ для максимальных и минимальных значений.

**Пример 2.2.9.** Для узла N (рис. 2.7) можно записать:  $I_1 \text{ ср} + I_2 \text{ ср} = I_3 \text{ ср}$ .

### 2.2.2. Пассивирование (компенсация) источника

#### Метод

В общем случае «реальный» источник энергии может быть заменен его внутренним пассивным сопротивлением. В случае «идеальных» источников (см. § 2.1.3) пассивирование состоит в замене источника напряжения коротким замыканием, а источника тока — разрывом цепи.

### 2.2.3. Теорема суперпозиции

Эта теорема вытекает непосредственно из свойства линейности активных и пассивных двухполюсников. Рассмотрим ее сначала для токов, затем для напряжений.

1. В линейной системе ток в ветви — это алгебраическая сумма токов, каждый из которых вызван каждым независимым, отдельно взятым источником при условии, что при рассмотрении одного источника остальные считаются пассивными.
2. В линейной системе напряжение между двумя зажимами — это алгебраическая сумма напряжений между этими зажимами, каждое из которых вызвано каждым из отдельно взятых имеющихся в системе независимых источников при условии, что при рассмотрении одного источника остальные считаются пассивными.

**Внимание!** Управляемые источники не должны считаться пассивными.

**Вопрос.** Имеем схему с двумя источниками (рис. 2.9). Определить напряжение  $u$  и ток  $i$ .

**Ответ.** 1) Пассивирован источник 2 (рис. 2.9)

$$u_1 = \frac{R_2 R_L e_1}{R_2 R_L + R_1(R_2 + R_L)}$$

и  $i_1 = \frac{R_2 e_1}{R_2 R_L + R_1(R_2 + R_L)}.$

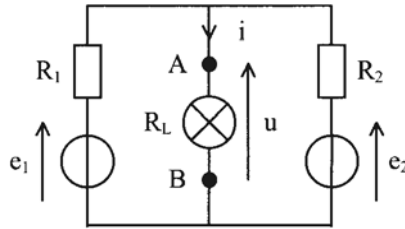
2) Пассивирован источник 1 (рис. 2.10)

$$u_2 = \frac{R_1 R_L e_2}{R_1 R_L + R_2(R_1 + R_L)}$$

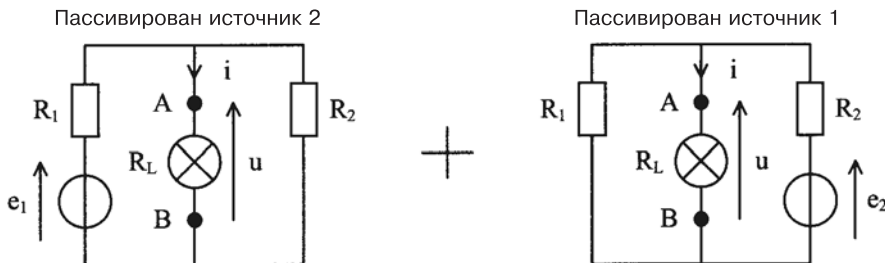
и  $i_2 = \frac{R_1 e_2}{R_1 R_L + R_2(R_1 + R_L)}.$

3) Следует (рис. 2.10):

$$u = u_1 + u_2 = \frac{R_L(R_2 e_1 + R_1 e_2)}{R_1 R_2 + R_L(R_2 + R_1)} \quad \text{и} \quad i = i_1 + i_2 = \frac{R_2 e_1 + R_1 e_2}{R_1 R_2 + R_L(R_2 + R_1)}.$$



**Рис. 2.9.** Схема с двумя источниками



**Рис. 2.10.** Суперпозиция двух состояний в схеме с двумя источниками

### 2.2.4. Теоремы Тевенена и Нортон

Весь активный линейный двухполюсник АВ, состоящий из сопротивлений, независимых и/или управляемых источников (см. § 2.2.3), может быть представлен (рис. 2.11):

1) Последовательной эквивалентной схемой (модель Тевенена), содержащей источник напряжения  $e_0$  и сопротивление  $R_0$ .

2) Параллельной эквивалентной схемой (модель Нортон), содержащей источник тока  $i_0$  и сопротивление  $R_0$ .

Здесь:  $e_0$  — напряжение холостого хода двухполюсника АВ, т.е. напряжение при отсутствии нагрузки между зажимами АВ,  $e_0 = u$  при  $i = 0$ ;  $i_0$  — ток короткого замыкания двухполюсника АВ, т.е. ток между замкнутыми накоротко зажимами А и В,  $i_0 = i$  при  $u = 0$ ;  $R_0$  — сопротивление со стороны зажимов АВ, равное эквивалентному, когда неуправляемые источники принимаются пассивными.

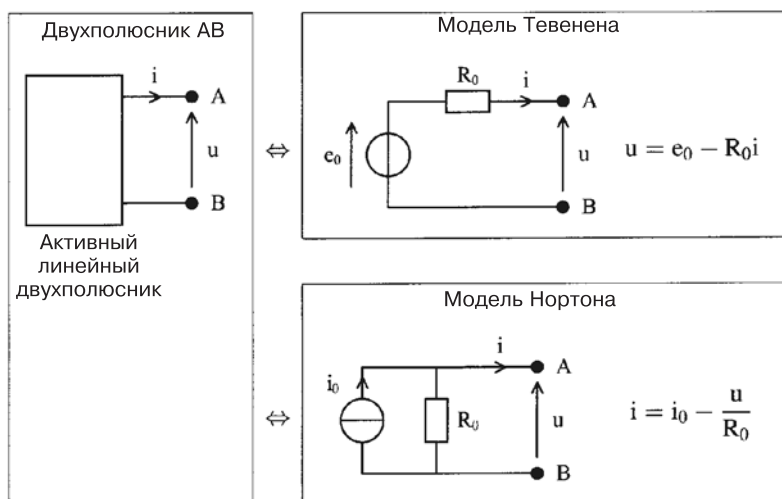


Рис. 2.11. Модели двухполюсника Тевенена и Нортон

#### Метод

Модели Тевенена и Нортон эквивалентны: то же напряжение  $u$  и тот же ток  $i$  для заданной нагрузки. Переход от одного к другому осуществляется соотношением:

$$e_0 = R_0 i_0.$$

**Внимание!** Для определения  $R_0$  принимаются пассивными только неуправляемые источники (независимые). Управляемые источники (зависимые) не должны приниматься пассивными.



**Примечание.** Модели Тевенена и Нортона эквивалентны только для внешних устройств. Они не учитывают рассеиваемую реальными цепями, замещенными моделями, мощность. Чтобы это показать, достаточно отметить, что на холостом ходу модель Тевенена мощность не рассеивает.

### Метод

Первым действием должно быть выделение двухполюсника, эквивалентная модель которого ищется, и «отсоединить» нагрузку.

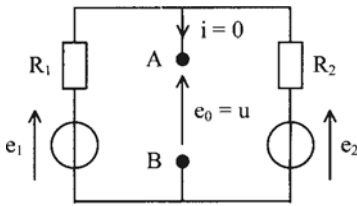
**Вопрос.** Построить модели Тевенена и Нортона ранее рассмотренных электрических схем (см. рис. 2.9).

**Ответ.** 1) Выражение  $e_0$  (рис. 2.12). Это напряжение холостого хода

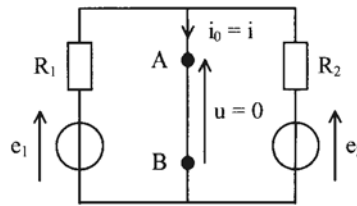
$$e_0 = u \quad \text{при} \quad i = 0 \quad \Rightarrow \quad e_0 = \frac{R_2 e_1 + R_1 e_2}{R_1 + R_2}.$$

2) Выражение  $i_0$  (рис. 2.13). Это ток короткого замыкания

$$i_0 = i \quad \text{при} \quad u = 0 \quad \Rightarrow \quad i_0 = \frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2}.$$



**Рис. 2.12.** Схема с двумя источниками. Выражение  $e_0$



**Рис. 2.13.** Схема с двумя источниками. Выражение  $i_0$

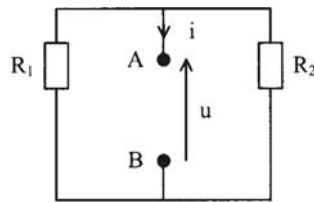
3) Выражение  $R_0$  (рис. 2.14). Сопротивление между зажимами АВ. Источники неуправляемые, приняты пассивными.

$$R_0 = \frac{u}{-i} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

4) Выражение  $u$  и  $i$ : Принимаем эквивалентную схему Тевенена или Нортона (рис. 2.15) и добавляем нагрузку. Затем из одной и из другой схем получаем:

$$u = \frac{R_L e_0}{R_0 + R_L} \quad \text{и} \quad i = \frac{R_0 i_0}{R_0 + R_L}$$

$$\text{при} \quad e_0 = R_0 i_0 \frac{1}{2}.$$



**Рис. 2.14.** Схема с двумя источниками. Выражение  $R_0$

Окончательно:

$$u = \frac{R_L(R_2 e_1 + R_1 e_2)}{R_1 R_2 + R_L(R_2 + R_1)} \quad \text{и} \quad i = \frac{u}{R_L} = \frac{R_2 e_1 + R_1 e_2}{R_1 R_2 + R_L(R_2 + R_1)}.$$

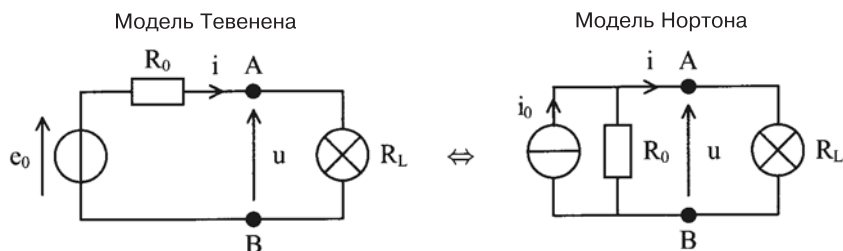


Рис. 2.15. Схема с двумя источниками. Эквивалентная схема с нагрузкой

**Вопрос.** Имеем схему псевдоинтегратора RC (рис. 2.16) в представлении Лапласа (см. гл. 10).

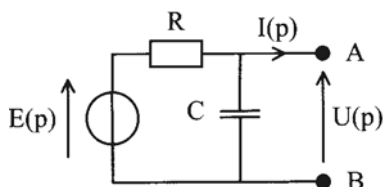


Рис. 2.16. Схема псевдоинтегратора RC

**Ответ.** Применив теоремы, получим:

$$E_0(p) = \frac{1}{1 + RC_p} E(p) \quad \text{и} \quad I_0 = \frac{E(p)}{R},$$

$$Z_0(p) = R // \frac{1}{C_p} = \frac{r}{1 + RC_p} \quad \text{и} \quad E_0(p) = Z_0(p) I_0(p).$$

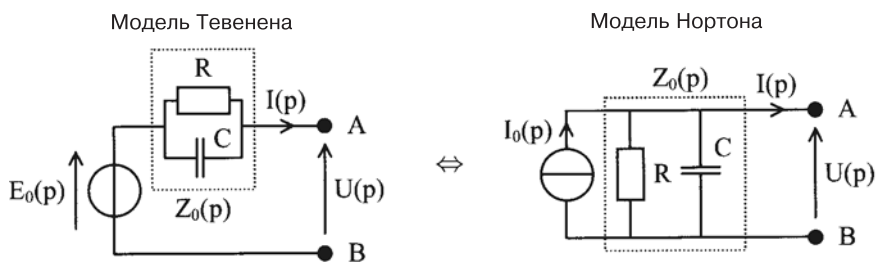


Рис. 2.17. Эквивалентные схемы псевдоинтегратора RC

### 2.2.5. Теорема Миллмана

При независимых источниках  $e_1, \dots, e_N$  двухполюсники (рис. 2.18) эквивалентны.

$$e_0 = \frac{\sum_{k=1}^N e_k G_k}{\sum_{k=1}^N G_k} = \frac{\sum_{k=1}^N e_k G_k}{G_0} \quad \text{и} \quad G_0 = \sum_{k=1}^N G_k,$$

где  $G_k = \frac{1}{R_k}$  — проводимость.

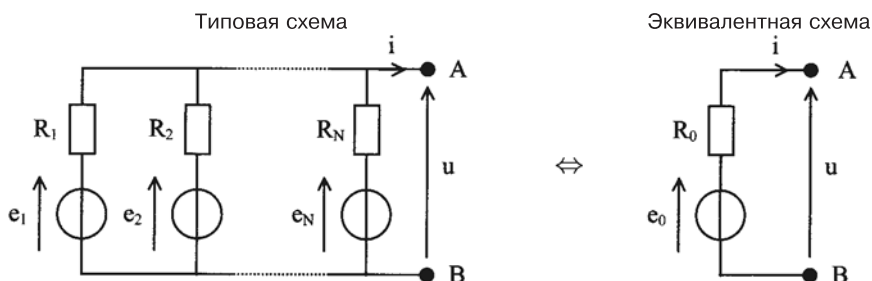


Рис. 2.18. Иллюстрация теоремы Миллмана

При  $N = 3$  получим:

$$e_0 = \frac{e_1 G_1 + e_2 G_2 + e_3 G_3}{G_1 + G_2 + G_3} \quad \text{и} \quad G_0 = G_1 + G_2 + G_3.$$

**Вопрос.** Выразить напряжение  $u$  и ток  $i$  в ранее рассмотренной схеме (см. рис. 2.9).

**Ответ.** Возможны два подхода.

Полагаем, что нагрузка не входит в состав двухполюсника. Тогда выбираем эквивалентную схему по модели Тевенена (рис. 2.15). Получаем:

$$e_0 = \frac{\frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2 e_1 + R_1 e_2}{R_1 + R_2} \quad \text{и} \quad G_0 = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Затем находят выражения напряжения  $u$  и тока  $i$ .

Полагаем, что нагрузка входит в состав двухполюсника. Тогда эта теорема позволяет прямо рассчитать напряжение  $u$  и затем ток  $i$ .

$$e_0 = \frac{\frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \frac{0}{R_L}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_L}} = \frac{R_L(R_2 e_1 + R_1 e_2)}{R_1 R_2 + R_L(R_2 + R_1)} \quad \text{и} \quad i = \frac{u}{R_L}.$$

**Внимание!** В знаменателе ветвь без источника забывать не следует.

### 2.2.6. Делитель напряжения. Делитель тока

Эти две схемы очень важны (табл. 2.4)

Таблица 2.4. Делитель напряжения. Делитель тока

|                     | Схема | Соотношения                                                         |
|---------------------|-------|---------------------------------------------------------------------|
| Делитель напряжения |       | $u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_0$ $u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_0$ |
| Делитель тока       |       | $i_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i_0$ $i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i_0$ |

**Внимание!** Приведенные формулы (табл. 2.4) справедливы только в случае, когда никакая внешняя нагрузка схему не изменяет.

### 2.2.7. Теорема Кеннели. Преобразования треугольник-звезда и звезда-треугольник (эквивалентность схем звезда и треугольник)

Теорема Кеннели позволяет перейти от схемы треугольник (П-образная схема) к схеме звезда (Т-образная схема) и обратно (табл. 2.5).

Таблица 2.5. К вопросу эквивалентности схем звезда и треугольник

| Схема звезда (Т-схема) | Схема треугольник (П-схема) |
|------------------------|-----------------------------|
|                        |                             |

Имеем соотношения:

$$R_A = \frac{R_{AB}R_{AC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}; \quad R_B = \frac{R_{AB}R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}};$$

$$R_C = \frac{R_{AC}R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}.$$

$$G_{AB} = \frac{G_A G_B}{G_A + G_B + G_C}; \quad G_{AC} = \frac{G_A G_C}{G_A + G_B + G_C};$$

$$G_{BC} = \frac{G_C G_B}{G_A + G_B + G_C}.$$

$$R_{AB} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_C}; \quad R_{AC} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_B};$$

$$R_{BC} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_A}.$$

### 2.2.8. Принцип линейности

В линейной цепи реакция сигнала  $s(t)$  представляет собой алгебраическую сумму реакций от каждого отдельно взятого источника (зависимого или нет) при условии пассивности остальных источников. Реализация возможна двумя способами:

1) Суммируем только отклики от каждого независимого источника (но не от управляемых) при пассивности остальных независимых (но не управляемых) источников. Затем используем теорему суперпозиции (см. § 2.2.3).

2) Суммируем все отклики от каждого источника, включая управляемые, все остальные источники, в том числе и управляемые, считаем пассивными. Сигнал отклика сигнала  $s(t)$  мы не получаем непосредственно, так как в выражение входят управляемые источники. Они неизвестны, поскольку зависят от других источников. Следует из полученного выражения исключить управляемые (зависимые) источники.