



# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

|               |    |
|---------------|----|
| Введение..... | 15 |
|---------------|----|

---

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>Предисловие .....</b> | <b>16</b> |
| Благодарность .....      | 17        |
| Об авторе.....           | 17        |
| О книге.....             | 18        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Фундаментальные понятия магнетизма .....</b>  | <b>19</b> |
| 1.1. Введение .....  | 20        |
| 1.2. Магнитные свойства в свободном пространстве.....  | 20        |
| 1.3. Усиление магнитного поля.....   | 21        |
| 1.4. Простейший трансформатор.....   | 24        |
| 1.5. Магнитный сердечник .....   | 24        |
| 1.6. Фундаментальные характеристики магнитного сердечника .....                              | 26        |
| 1.7. Зависимость $B(H)$ при повторном перемагничивании сердечника.....                       | 28        |
| 1.8. Магнитная проницаемость.....  | 28        |
| 1.9. Магнитодвижущая сила (МДС) и намагничивающая сила ( $H$ ).....                          | 32        |
| 1.10. Магнитное сопротивление.....   | 34        |
| 1.11. Воздушный зазор.....   | 35        |
| 1.12. Управление величиной постоянного магнитного потока<br>с помощью воздушного зазора..... | 38        |
| 1.13. Типы воздушных зазоров .....   | 39        |
| 1.14. Краевой магнитный поток .....  | 40        |
| 1.15. Магнитная проницаемость материала.....   | 41        |
| 1.16. Воздушные зазоры .....   | 42        |
| 1.17. Краевой магнитный поток, фактор $F$ .....  | 42        |
| 1.18. Расчёт длины зазора в дросселе постоянного тока .....                                  | 43        |
| 1.19. Краевой магнитный поток и способ намотки катушки .....                                 | 45        |
| 1.20. Краевой магнитный поток в уплотнённой среде .....                                      | 45        |
| 1.21. Краевой магнитный поток в порошковых сердечниках .....                                 | 46        |

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>2 Магнитные материалы и их характеристики .....</b>                    | <b>48</b> |
| 2.1. Введение .....   | 49        |
| 2.2. Насыщение.....   | 49        |
| 2.3. Остаточная индукция $B_r$ и коэрцитивная сила $H_c$ .....            | 50        |
| 2.4. Магнитная проницаемость $\mu$ .....                                  | 50        |
| 2.5. Потери на гистерезис, сопротивление потерь $\rho$ в сердечнике ..... | 50        |
| 2.6. Кремниевая сталь .....   | 51        |
| 2.7. Тонкая лента из никелевого сплава.....                               | 51        |
| 2.8. Металлическое стекло .....   | 55        |

|   |    |
|---|----|
| 2.9. Магнито-мягкие ферриты .....                                   | 59 |
| 2.10. Марганец-цинковые ферриты .....                               | 61 |
| 2.11. Никель-цинковые ферриты .....                                 | 61 |
| 2.12. Ферриты: обзор .....  | 62 |
| 2.13. Порошковые сердечники из молибденового пермаллоя .....        | 63 |
| 2.14. Железные порошковые сердечники .....                          | 64 |
| 2.15. Потери в сердечнике .....                                     | 70 |
| 2.16. Уравнения для потерь в сердечнике .....                       | 71 |
| 2.17. Отбор магнитных материалов .....                              | 74 |
| 2.18. Несимметричное намагничивание .....                           | 74 |
| 2.19. Характеристики материала .....                                | 75 |
| 2.20. Уточнение границ области насыщения магнитного материала ..... | 77 |
| 2.21. Условия и результаты измерений .....                          | 80 |
| 2.22. Теория насыщения магнитного материала .....                   | 84 |
| 2.23. Влияние воздушного зазора .....                               | 85 |
| 2.24. Эффект введения зазора .....                                  | 86 |
| 2.25. Составной сердечник .....                                     | 93 |
| 2.26. Заключение .....  | 96 |

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3 Магнитные сердечники .....</b>  | <b>98</b> |
| 3.1. Введение .....  | 99        |
| 3.2. Типы и конструкции сердечников .....  | 100       |
| 3.3. Типы материалов сердечника .....  | 101       |
| 3.4. Вихревые токи и изоляция .....  | 101       |
| 3.5. Стальные пластины .....   | 102       |
| 3.6. Отжиг и снятие стресса .....  | 104       |
| 3.7. Сборка пакета пластин и их взаимная ориентация .....                                      | 104       |
| 3.8. Уплотнение потока .....   | 105       |
| 3.9. Ток возбуждения .....   | 106       |
| 3.10. Ленточные С-, ЕЕ- и тороидальные сердечники .....  | 107       |
| 3.11. Ленточные тороидальные сердечники .....  | 109       |
| 3.12. Порошковый тороидальный сердечник .....  | 109       |
| 3.13. Коэффициент заполнения сталью .....  | 110       |
| 3.14. Данные для проектирования сердечников из ЕІ-пластин .....                                | 111       |
| 3.15. Данные для проектирования сердечников из UІ-пластин .....                                | 112       |
| 3.16. Данные для проектирования сердечников из LL-пластин .....                                | 113       |
| 3.17. Данные для проектирования сердечников из DU-пластин .....                                | 115       |
| 3.18. Данные для проектирования трёхфазных трансформаторов<br>на основе стальных пластин ..... | 116       |
| 3.19. Данные для проектирования ленточных витых С-сердечников .....                            | 117       |
| 3.20. Очертания ленточных намотанных ЕЕ-сердечников .....                                      | 118       |
| 3.21. Параметры ленточных витых тороидальных сердечников .....                                 | 119       |
| 3.22. Параметры ЕЕ-сердечников из феррита .....  | 121       |
| 3.23. Параметры планарных ферритовых ЕЕ- и ЕІ-сердечников .....                                | 122       |

|  |     |
|--|-----|
| 3.24. Параметры ферритовых ЕС-сердечников .....                      | 123 |
| 3.25. Параметры ферритовых ЕТD-сердечников.....                      | 124 |
| 3.26. Параметры ферритовых ЕТD-сердечников.....                      | 125 |
| 3.27. Параметры ферритовых ЕR-сердечников .....                      | 126 |
| 3.28. Параметры ферритовых ЕFD-сердечников .....                     | 127 |
| 3.29. Параметры ферритовых ЕРС-сердечников .....                     | 128 |
| 3.30. Параметры ферритовых РС-сердечников .....                      | 129 |
| 3.31. Параметры ферритовых ЕР-сердечников .....                      | 130 |
| 3.32. Параметры ферритовых RQ-сердечников.....                       | 131 |
| 3.33. Параметры низкопрофильных ферритовых RQ-сердечников.....       | 133 |
| 3.34. Параметры ферритовых RМ-сердечников.....                       | 134 |
| 3.35. Параметры низкопрофильных ферритовых RМ-сердечников.....       | 135 |
| 3.36. Параметры ферритовых DS-сердечников .....                      | 136 |
| 3.37. Параметры ферритовых UUR-сердечников.....                      | 137 |
| 3.38. Параметры ферритовых UUS-сердечников .....                     | 138 |
| 3.39. Параметры тороидальных ферритовых сердечников.....             | 139 |
| 3.40. Параметры тороидальных порошковых МРР-сердечников.....         | 140 |
| 3.41. Параметры порошковых железных тороидальных сердечников .....   | 142 |
| 3.42. Параметры тороидальных сендастовых порошковых сердечников..... | 143 |
| 3.43. Параметры тороидальных порошковых сердечников High Flux .....  | 145 |
| 3.44. Параметры железных порошковых ЕЕ-сердечников .....             | 146 |
| 3.45. Параметры сендастовых порошковых ЕЕ-сердечников.....           | 148 |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>4</b> <b>Использование окна сердечника, обмоточный провод и изоляция .....</b> | <b>149</b> |
| 4.1. Коэффициент заполнения окна.....   | 150        |
| 4.2. Изоляция провода, $S_1$ .....  | 151        |
| 4.3. Коэффициент заполнения обмоткой.....   | 152        |
| 4.4. Эффективная площадь окна.....  | 155        |
| 4.5. Коэффициент влияния изоляции.....  | 157        |
| 4.6. Заключение.....  | 158        |
| 4.7. Коэффициент заполнения окна для ферритовых сердечников с катушкой .....      | 159        |
| 4.8. Провод круглого и квадратного сечения с диаметром и стороной 0.0254 мм ..... | 161        |
| 4.9. Обмоточный провод .....  | 161        |
| 4.10. Плёночная изоляция обмоточного провода .....                                | 162        |
| 4.11. Таблица проводов.....   | 163        |
| 4.12. Изоляция, которую можно паять .....   | 166        |
| 4.13. Укреплённый обмоточный провод.....  | 167        |
| 4.14. Базовая плёночная изоляция.....   | 167        |
| 4.15. Методы нанесения укрепляющего покрытия .....                                | 168        |
| 4.16. Миниатюрный обмоточный провод прямоугольного сечения .....                  | 168        |
| 4.17. Многожильный провод и поверхностный эффект.....                             | 169        |
| 4.18. Уменьшение скин-эффекта в трансформаторах.....                              | 170        |

|   |     |
|---|-----|
| 4.19. Расчёт скин-эффекта в дросселе постоянного тока .....         | 171 |
| 4.20. Многожильный провод типа литцендрат .....                     | 174 |
| 4.21. Эффект близости.....  | 175 |
| 4.22. Эффект близости в трансформаторах.....                        | 176 |
| 4.23. Высокочастотные трансформаторы с многослойными обмотками..... | 176 |
| 4.24. Анализ эффекта близости при помощи кривых Доула .....         | 179 |
| 4.25. Специальные провода.....                                      | 180 |
| 4.26. Провод с тройной изоляцией.....                               | 181 |
| 4.27. Литцендрат с тройной изоляцией .....                          | 182 |
| 4.28. Многожильный обмоточный провод .....                          | 182 |
| 4.29. Стандартная фольга .....                                      | 183 |
| 4.30. Использование фольги.....                                     | 184 |
| 4.31. Расчёт средней длины витка .....                              | 187 |
| 4.32. Расчёт средней длины витка тороидального сердечника.....      | 188 |
| 4.33. Расчёт сопротивления меди обмотки.....                        | 188 |
| 4.34. Расчёт веса меди .....  | 188 |
| 4.35. Электрический изоляционный материал .....                     | 189 |
| 4.36. Источники .....   | 189 |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>5</b> <b>Этапы проектирования трансформатора .....</b>  | <b>190</b> |
| 5.1. Введение .....  | 191        |
| 5.2. Общие проблемы проектирования.....  | 191        |
| 5.3. Способность передавать мощность .....   | 192        |
| 5.4. Взаимосвязь $A_p$ и способности сердечника передавать мощность .....                              | 193        |
| 5.5. Взаимосвязь $K_g$ с диапазоном регулирования нагрузки<br>и способностью передавать мощность ..... | 193        |
| 5.6. Произведение площадей трансформатора $A_p$ .....  | 194        |
| 5.7. Объём трансформатора и произведение площадей $A_p$ .....  | 194        |
| 5.8. Вес трансформатора и произведение площадей $A_p$ .....  | 197        |
| 5.9. Площадь поверхности трансформатора в зависимости<br>от произведения площадей $A_p$ .....          | 198        |
| 5.10. Плотность тока трансформатора $J$ и произведение площадей<br>сердечника $A_p$ .....              | 202        |
| 5.11. Геометрия сердечника трансформатора и произведение площадей<br>сердечника .....                  | 204        |
| 5.12. Вес трансформатора в зависимости от диапазона регулирования<br>нагрузки.....                     | 206        |
| 5.13. Источники .....  | 208        |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>6</b> <b>Эффективность трансформаторов и дросселей, влияние изменения<br/>нагрузки и температуры.....</b> | <b>209</b> |
| 6.1. Введение .....  | 210        |
| 6.2. Эффективность трансформатора.....   | 210        |

|   |     |
|---|-----|
| 6.3. Максимальная эффективность.....  | 210 |
| 6.4. Рассеивание мощности трансформатором посредством радиации и конвекции.....     | 212 |
| 6.5. Рост температуры в зависимости от площади рассеивающей поверхности $A_c$ ..... | 213 |
| 6.6. Площадь поверхности, необходимая для рассеивания выделяющегося тепла.....      | 214 |
| 6.7. Требуемая площадь поверхности $A_c$ .....                                      | 215 |
| 6.8. Зависимость напряжения от нагрузки .....                                       | 216 |
| 6.9. Источники.....   | 218 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>7 Проектирование силового трансформатора .....</b>  | <b>219</b> |
| 7.1. Введение .....  | 220        |
| 7.2. Общие проблемы проектирования.....  | 220        |
| 7.3. Способность передавать мощность.....  | 221        |
| 7.4. Связь выходной мощности $P_o$ и расчётной мощности $P_t$ .....  | 222        |
| 7.5. Многообмоточные трансформаторы .....  | 224        |
| 7.6. Зависимость напряжения от нагрузки.....   | 226        |
| 7.7. Взаимосвязь $K_g$ и способности трансформатора поддерживать стабильное напряжение на выходе при изменении нагрузки .....            | 227        |
| 7.8. Взаимосвязь $A_p$ и способности трансформатора передавать мощность.....   | 228        |
| 7.9. Сердечники с одинаковым произведением площадей .....  | 229        |
| 7.10. Проектирование 250 Вт изолирующего трансформатора с использованием коэффициента, характеризующего геометрию сердечника $K_g$ ..... | 230        |
| 7.11. Проектирование трансформатора на 38 Вт и 100 кГц с использованием коэффициента $K_g$ , характеризующего геометрию сердечника ..... | 234        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>8 Проектирование дросселей постоянного тока с зазором в магнитопроводе .....</b>                  | <b>243</b> |
| 8.1. Введение .....  | 244        |
| 8.2. Критическая индуктивность для дросселя выпрямителя синусоидального напряжения .....             | 244        |
| 8.3. Критическая индуктивность дросселя для регулятора напряжения понижающего типа .....             | 245        |
| 8.4. Материалы сердечников, используемых в преобразователях с широтно-импульсным регулированием..... | 248        |
| 8.5. основополагающие положения .....  | 249        |
| 8.6. Краевой поток.....  | 251        |
| 8.7. Дроссели .....  | 252        |
| 8.8. Связь произведения площадей сердечника и способности дросселя передавать энергию .....          | 253        |

|   |     |
|---|-----|
| 8.9. Связь коэффициента геометрии $K_g$ и способности дросселя передавать энергию .....                             | 253 |
| 8.10. Пример проектирования дросселя с зазором с использованием коэффициента геометрии сердечника $K_g$ .....       | 254 |
| 8.11. Пример проектирования дросселя с зазором с использованием метода произведения площадей сердечника $A_p$ ..... | 259 |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>9 Проектирование дросселей постоянного тока с порошковыми сердечниками .....</b>                           | <b>265</b> |
| 9.1. Введение .....   | 266        |
| 9.2. Порошковые сердечники из молибденового пермаллоя (МРР) .....   | 266        |
| 9.3. Порошковые сердечники типа High Flux (HF) .....  | 266        |
| 9.4. Сендастовые порошковые сердечники (Magnetics Kool Mμ) .....  | 267        |
| 9.5. Железные порошковые сердечники .....   | 267        |
| 9.6. Дроссели .....   | 268        |
| 9.7. Отношение произведения площадей $A_p$ к способности дросселя передавать энергию .....                    | 268        |
| 9.8. Отношение коэффициента геометрии $K_g$ к способности дросселя передавать энергию .....                   | 269        |
| 9.9. Фундаментальные положения .....  | 270        |
| 9.10. Проектирование тороидального порошкового сердечника с использованием коэффициента геометрии $K_g$ ..... | 272        |
| 9.11. Проектирование тороидального порошкового сердечника с использованием произведения площадей $A_p$ .....  | 277        |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>10 Проектирование дросселей переменного тока .....</b>                          | <b>282</b> |
| 10.1. Введение .....   | 283        |
| 10.2. Требования .....   | 283        |
| 10.3. Связь произведения площадей $A_p$ сердечника с вольт-амперами дросселя ..... | 283        |
| 10.4. Связь коэффициента геометрии $K_g$ с вольт-амперами дросселя .....           | 284        |
| 10.5. Фундаментальные соотношения .....  | 284        |
| 10.6. Краевой поток .....  | 285        |
| 10.7. Пример проектирования дросселя переменного тока .....                        | 288        |
| 10.8. Источники .....  | 292        |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>11 Трансформаторные стабилизаторы переменного напряжения .....</b> | <b>293</b> |
| 11.1. Введение .....  | 294        |
| 11.2. Регулировочные характеристики .....                             | 294        |
| 11.3. Электрические параметры .....                                   | 294        |
| 11.4. Уравнения для проектирования .....                              | 296        |
| 11.5. Пример проектирования .....                                     | 299        |

|  |     |
|--|-----|
| 11.6. Пример проектирования дросселя переменного тока..... | 304 |
| 11.7. Источники .....                                      | 307 |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>12</b> Проектирование трёхфазного трансформатора .....   | <b>308</b> |
| 12.1. Введение .....  | 309        |
| 12.2. Основные схемы соединения обмоток трансформатора .....  | 309        |
| 12.3. Сравнение физических размеров трансформаторов.....  | 309        |
| 12.4. Фазный и линейный ток в треугольнике .....  | 311        |
| 12.5. Фазное, линейное напряжение и ток в схеме трёхфазной звезды.....  | 312        |
| 12.6. Сравнение мощностей в однофазной и многофазной системах .....   | 312        |
| 12.7. Многофазные выпрямительные схемы.....   | 313        |
| 12.8. Произведение площадей $A_p$ и коэффициент геометрии $K_g$<br>для трёхфазных трансформаторов .....             | 316        |
| 12.9. Связь выходной и расчётной мощности.....  | 317        |
| 12.10. Связь коэффициента геометрии с зависимостью выходного<br>напряжения силового трансформатора от нагрузки..... | 318        |
| 12.11. Связь произведения площадей сердечника $A_p$ со способностью<br>трансформатора передавать мощность .....     | 319        |
| 12.12. Пример проектирования трёхфазного трансформатора .....   | 319        |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>13</b> Проектирование трансформатора обратного<br>преобразователя напряжения.....             | <b>324</b> |
| 13.1. Введение .....   | 325        |
| 13.2. Передача энергии.....  | 325        |
| 13.3. Режим разрывного тока.....   | 326        |
| 13.4. Режим непрерывного тока.....   | 326        |
| 13.5. Граничный режим тока дросселя .....  | 327        |
| 13.6. Понижающий регулятор напряжения.....   | 327        |
| 13.7. Повышающий преобразователь напряжения .....  | 330        |
| 13.8. Инвертирующий<br>повышающе-понижающий преобразователь.....                                 | 333        |
| 13.9. Повышающе-понижающий преобразователь с трансформаторным<br>выходом.....                    | 335        |
| 13.10. Поверхностный эффект .....  | 339        |
| 13.11. Пример расчёта повышающего преобразователя, работающего<br>в режиме разрывного тока ..... | 346        |
| 13.12. Поверхностный эффект .....  | 347        |
| 13.13. Проектирование дросселя для повышающего корректора<br>коэффициента мощности.....          | 352        |
| 13.14. Стандартная схема повышающего преобразователя .....                                       | 353        |
| 13.15. Корректор коэффициента мощности на основе повышающего<br>преобразователя.....             | 353        |

|   |     |
|---|-----|
| 13.16. Пример проектирования дросселя с непрерывным током для ККМ на основе повышающего преобразователя ..... | 354 |
| 13.17. Поверхностный эффект .....   | 355 |
| 13.18. Источники.....   | 359 |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>14</b> Проектирование трансформатора и выходного дросселя прямоходового преобразователя ..... | <b>360</b> |
| 14.1. Введение .....   | 361        |
| 14.2. Описание работы схемы.....   | 361        |
| 14.3. Сравнение траекторий перемагничивания сердечника в координатах $B-H$ .....                 | 362        |
| 14.4. Проектирование трансформатора с использованием коэффициента геометрии $K_g$ .....          | 365        |
| 14.5. Расчёт дросселя фильтра прямоходового преобразователя .....                                | 370        |
| 14.6. Проектирование выходного дросселя с использованием коэффициента геометрии $K_g$ .....      | 372        |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>15</b> Проектирование входного фильтра .....               | <b>378</b> |
| 15.1. Введение .....  | 379        |
| 15.2. Конденсатор.....  | 379        |
| 15.3. Дроссель.....   | 380        |
| 15.4. Осцилляция.....   | 381        |
| 15.5. Подключение первичного источника мощности.....          | 382        |
| 15.6. Резонансный заряд.....                                  | 383        |
| 15.7. Процедура проектирования дросселя входного фильтра..... | 385        |
| 15.8. Данные для проектирования входного фильтра.....         | 386        |
| 15.9. Источники.....  | 389        |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>16</b> Проектирование трансформатора тока.....         | <b>390</b> |
| 16.1. Введение .....                                      | 391        |
| 16.2. Анализ составляющих входного тока.....              | 391        |
| 16.3. Уникальность трансформатора тока .....              | 393        |
| 16.4. Примеры схем, использующих трансформатор тока ..... | 394        |
| 16.5. Пример проектирования трансформатора тока.....      | 396        |
| 16.6. Результаты проектирования .....                     | 398        |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>17</b> Ёмкость обмотки и индуктивность рассеивания ..... | <b>400</b> |
| 17.1. Введение .....  | 401        |
| 17.2. Паразитные эффекты .....                              | 401        |
| 17.3. Поток рассеивания .....                               | 402        |
| 17.4. Минимизация индуктивности рассеивания .....           | 405        |

|  |     |
|--|-----|
| 17.5. Ёмкость обмотки.....                           | 406 |
| 17.6. Межвитковая ёмкость обмотки.....               | 408 |
| 17.7. Межслойная ёмкость обмотки трансформатора..... | 408 |
| 17.8. Межобмоточная ёмкость.....                     | 409 |
| 17.9. Паразитная ёмкость.....                        | 410 |
| 17.10. Источники.....                                | 411 |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>18 Проектирование малозадающего преобразователя .....</b>                                    | <b>412</b> |
| 18.1. Введение .....  | 413        |
| 18.2. Преобразователь напряжения.....   | 413        |
| 18.3. Регулирование и фильтрация.....   | 414        |
| 18.4. Преобразователь тока.....   | 415        |
| 18.5. Малозадающий преобразователь .....  | 415        |
| 18.6. Регулирование и фильтрация.....   | 416        |
| 18.7. Временные диаграммы токов и напряжений малозадающего преобразователя .....                | 416        |
| 18.8. Технология на марше.....  | 419        |
| 18.9. Коэффициент использования окна.....   | 419        |
| 18.10. Температурная стабильность .....   | 420        |
| 18.11. Определение расчётной мощности .....   | 420        |
| 18.12. Расчётные соотношения малозадающего преобразователя.....                                 | 421        |
| 18.13. Проектирование трансформатора на основе рассчитанного коэффициента геометрии $K_g$ ..... | 425        |
| 18.14. Обзор результатов проектирования .....   | 429        |
| 18.15. Источники.....   | 432        |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>19 Проектирование роторного трансформатора .....</b>               | <b>434</b> |
| 19.1. Введение .....  | 435        |
| 19.2. Базовая конструкция роторного трансформатора.....               | 435        |
| 19.3. Особенности работы с кривой напряжения прямоугольной формы..... | 436        |
| 19.4. Индуктивность рассеивания роторного трансформатора.....         | 437        |
| 19.5. Двухтактный резонансный преобразователь тока.....               | 439        |
| 19.6. Трудности при проектировании роторного трансформатора .....     | 440        |
| 19.7. Источники.....  | 442        |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>20 Планарные трансформаторы .....</b>                                     | <b>443</b> |
| 20.1. Введение .....   | 444        |
| 20.2. Базовая конструкция планарного трансформатора .....                    | 444        |
| 20.3. Планарные интегральные магнетики с печатными обмотками .....           | 446        |
| 20.4. Геометрия сердечника .....   | 447        |
| 20.5. Уравнения для проектирования планарного трансформатора и дросселя..... | 448        |

|  |            |
|--|------------|
| 20.6. Коэффициент использования окна сердечника.....                                       | 449        |
| 20.7. Плотность тока $J$ .....   | 450        |
| 20.8. Печатные обмотки.....  | 453        |
| 20.9. Расчёт средней длины витка.....  | 454        |
| 20.10. Сопротивление обмотки и рассеиваемая мощность.....                                  | 454        |
| 20.11. Ёмкость печатной обмотки.....   | 455        |
| 20.12. Проектирование планарного дросселя.....   | 456        |
| 20.13. Внешний вывод обмотки.....  | 457        |
| 20.14. Базовые материалы для печатных плат.....  | 458        |
| 20.15. Сборка и монтаж сердечника.....   | 459        |
| 20.16. Источники.....  | 460        |
| <hr/>  |            |
| <b>21 Источники уравнений проектирования.....</b>  | <b>461</b> |
| 21.1. Связь выходной мощности $P_o$ с расчётной мощностью $P_t$ .....                      | 462        |
| 21.2. Проектирование трансформатора на основе коэффициента геометрии $K_g$ .....           | 463        |
| 21.3. Проектирование трансформатора на основе произведения площадей сердечника $A_p$ ..... | 466        |
| 21.4. Проектирование дросселя на основе коэффициента геометрии сердечника $K_g$ .....      | 467        |
| 21.5. Проектирование дросселя на основе произведения площадей сердечника.....              | 470        |
| 21.6. Зависимость выходного напряжения трансформатора от нагрузки.....                     | 473        |

# ВВЕДЕНИЕ

---

Вильям Маклиман (Mc Luman) – известный автор, лектор и разработчик магнитных устройств. Его предыдущие книги, посвящённые проектированию трансформаторов и дросселей, характеристикам магнитных сердечников, методам проектирования преобразовательных схем, широко используются разработчиками. В этой книге автор собрал и обработал содержащуюся в них информацию, а также добавил разделы, посвящённые роторному трансформатору, проектированию планарного трансформатора и планарной конструкции. Автор связал все вопросы проектирования магнитных устройств соответствующими расчётными соотношениями наряду с полной информацией о свойствах магнитных материалов и характеристиках сердечников. В дополнение ко всему, рассмотрен шаг за шагом процесс проектирования.

Эта книга полезна в первую очередь инженерам – проектировщикам магнитных устройств. Если Ваша цель – проектирование первоклассных изделий низкой стоимости – эта книга для Вас. Спасибо, Маклиман, за хорошо сделанную полезную книгу.

*Роберт Дж. Ноач*

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Ко мне поступило много обращений с просьбой издать справочную книгу по проектированию трансформаторов и дросселей в связи с тенденциями развития силовой электроники за последние несколько лет. Это издание содержит 21 главу, среди которых есть абсолютно новые: «Прямоходовой преобразователь», «Обратноходовой преобразователь», «Малошумящий преобразователь», «Роторные трансформаторы» и «Планарные трансформаторы». Рассмотрено много примеров проектирования.

Эта книга предлагает инженерам, работающим в электронной и аэрокосмической отраслях промышленности, пути практических решений с примерами проектирования. Трансформаторы можно найти во всех электронных системах. Эта книга может быть использована при ручном проектировании малогабаритных высокочастотных и низкочастотных трансформаторов для коммерческого и специального использования.

Процесс преобразования энергии в устройствах силовой электроники требует использования трансформаторов, которые часто являются наиболее габаритными и тяжёлыми элементами всего устройства. Трансформаторы также оказывают существенное влияние на весь процесс преобразования и его эффективность, а так же определяют вес и цену устройства. В связи с сильной взаимозависимостью этих показателей необходима оптимизация процесса проектирования.

Производители в течение многих лет вырабатывали специальный код, характеризующий способность сердечников передавать мощность. Для каждого сердечника указывается коэффициент  $A_p$  равный произведению площадей окна сердечника  $W_a$  и площади поперечного сечения среднего стержня  $A_c$ . Эти данные используются для суммирования размеров и электрических характеристик.

Произведение площадей  $A_p$  измеряется в  $\text{см}^4$ . Я ввёл в практику новый коэффициент, характеризующий способность сердечника передавать мощность, – это коэффициент геометрии  $K_g$ , измеряемый в  $\text{см}^5$ . Этот коэффициент позволяет инженеру более жёстко контролировать процесс проектирования. Это относительно новая концепция и производители сердечников начинают включать коэффициент в свои каталоги.

Ввиду своей значительности коэффициенты  $K_g$  и  $A_p$  интенсивно используются в этой книге. Разработчику также предоставляется значительное количество другой информации; многие данные сведены в таблицы, что позволяет быстрее достичь желаемого результата.

Инженеры используют разные подходы к процессу проектирования. Часто используются чисто эмпирические соотношения. Так, например, плотность тока не рассчитывается, а принимается равной  $200 \text{ А/см}^2$ . Это во многих случаях допустимо, но часто при такой плотности тока трансформатор получается неоправданно большим и тяжёлым. Информация, содержащаяся в этой книге, позволяет избежать использования этого и других чисто эмпирических соотношений. Материал организован так, что инженер или техник от начала и до конца книги получают понятие об искусстве проектирования трансформатора или дросселя.

Автор и издатель не несут никакой ответственности за использование данных, схем или процессов, описанных в этой книге.

## Благодарность

В процессе подготовки материала для книги я имел счастье сотрудничать со многими компаниями и коллегами. Всем им я хочу выразить благодарность. Однако некоторым людям и компаниям, чей вклад был особенно значительным, я выразил благодарность поимённо перед каждой главой, в написании которой они принимали участие.

## Об авторе

Вильям Маклиман (Mc Lyman) недавно ушёл в отставку с должности руководителя секции авиационного оборудования лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory), которая является филиалом Калифорнийского технологического института в Пасадене. У него 47-летний стаж работы в области магнитных материалов и он является держателем 14 патентов США, связанных с этой областью. За 30 лет работы в JPL им было выпущено более 70 технических меморандумов, отчётов по новой технологии и краткой технической информации, касающейся магнетиков и схемотехнических решений в области силовых преобразователей. Он принимал участие в работах по проектам NASA, включая Pathfinder Mission to Mars, Cassini, Galileo, Magellan, Viking, Voyager, MVM, Hubble Space Telescope и многих других.

Более 20 лет он читал лекции в США, Канаде, Мексике и в Европе по теме проектирования и изготовления магнитных компонентов. В этой области он является признанным авторитетом. Он президент собственной компании Kg Magnetics Inc, которая специализируется в области проектирования магнитных элементов силовой электроники.

Недавно вышла новая книга «Высоконадёжные магнитные приборы. Проектирование и производство» (Marcel Dekker inc). Он является одним из авторов

компьютерной программы «Titan», посвящённой проектированию трансформаторов и дросселей. Программа используется в Windows 95, 98, 2000 и NT.

## О книге

Это третье издание существенно пересмотрено и дополнено, чтобы максимально полно представить ситуацию в искусстве проектирования магнетиков. Оно представляет собой практический подход к вопросам проектирования трансформаторов и дросселей. Широко используются понятия произведения площадей сердечника  $A_p$  и коэффициент геометрии  $K_g$ .

Читателю представляется обширная информация о магнитных материалах и характеристиках сердечников. Рассмотрены примеры проектирования, где шаг за шагом рассчитываются все свойства трансформатора или дросселя.

Книга характеризует все ключевые компоненты для проектирования лёгких, высокочастотных трансформаторов аэрокосмических объектов или низкочастотных коммерческих трансформаторов.

В это издание включены новые разделы, связанные с малошумящим преобразователем, проектированием роторного трансформатора, проектированием планарного трансформатора, включая перечень процедур, имеющих большое значение для инженеров, работающих в электронной и аэрокосмической областях.

Даётся много характеристик материалов в виде таблиц, помогающих быстрее найти удачное проектное решение.

# 1

## Фундаментальные понятия магнетизма

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Введение   | 20 |
| 2  | Магнитные свойства в свободном пространстве                                    | 20 |
| 3  | Усиление магнитного поля   | 21 |
| 4  | Простейший трансформатор   | 24 |
| 5  | Магнитный сердечник  | 24 |
| 6  | Фундаментальные характеристики магнитного сердечника                           | 26 |
| 7  | Зависимость $B(H)$ при повторном перемагничивании сердечника                   | 28 |
| 8  | Магнитная проницаемость  | 28 |
| 9  | Магнитодвижущая сила (МДС) и намагничивающая сила ( $H$ )                      | 32 |
| 10 | Магнитное сопротивление  | 34 |
| 11 | Воздушный зазор  | 35 |
| 12 | Управление величиной постоянного магнитного потока с помощью воздушного зазора | 38 |
| 13 | Типы воздушных зазоров   | 39 |
| 14 | Краевой магнитный поток  | 40 |
| 15 | Магнитная проницаемость материала  | 41 |
| 16 | Воздушные зазоры   | 42 |
| 17 | Краевой магнитный поток, фактор $F$  | 42 |
| 18 | Расчёт длины зазора в дросселе постоянного тока                                | 43 |
| 19 | Краевой магнитный поток и способ намотки катушки                               | 45 |
| 20 | Краевой магнитный поток в уплотнённой среде                                    | 45 |
| 21 | Краевой магнитный поток в порошковых сердечниках                               | 46 |

## 1.1. Введение

При анализе свойств магнитного поля встречаются значительные трудности из-за использования большого количества различных систем единиц, как-то СГС (сантиметр–грамм–секунда), МКС (метр–килограмм–секунда) или смешанной английской системы. Можно было бы договориться использовать систему СГС, но всегда есть по крайней мере одно исключение из правила – это магнитная проницаемость.

## 1.2. Магнитные свойства в свободном пространстве

Длинный провод с текущим по нему постоянным током генерирует круговое магнитное поле напряжённостью  $H$  и индукцией  $B$ , которое создаётся вокруг проводника (рис. 1.1).

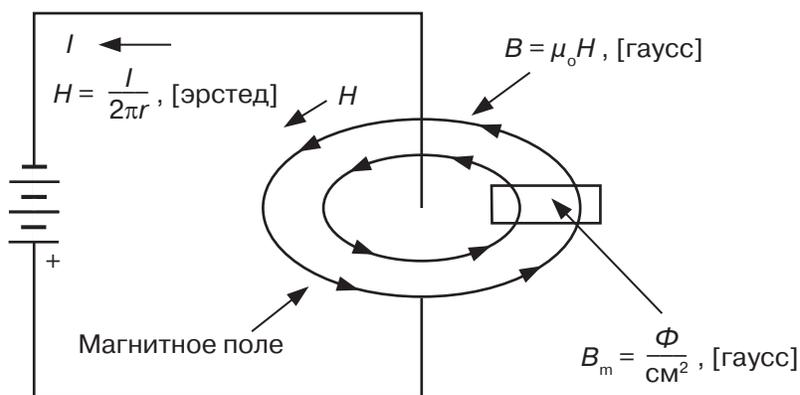
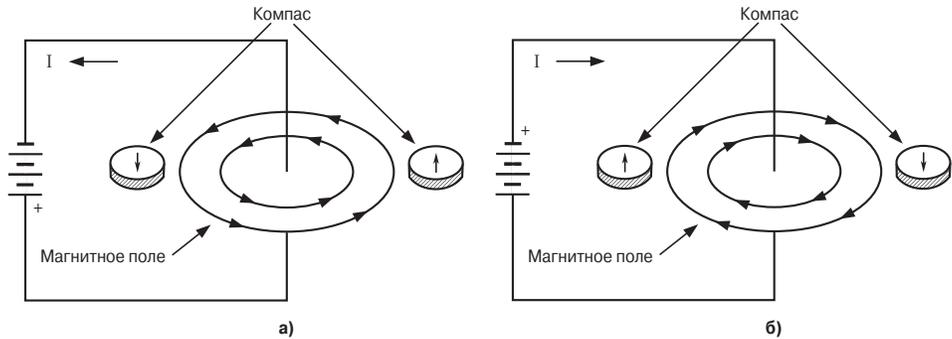


Рис. 1.1. Магнитное поле, созданное проводником с током

Направление вектора магнитного потока вокруг проводника может быть определено с помощью «правила правой руки»: если проводник зажать кистью правой руки так, чтобы большой палец показывал направление тока, то пальцы покажут направление силовых линий магнитного поля. Здесь имеется в виду техническое направление тока, а не потока электронов.

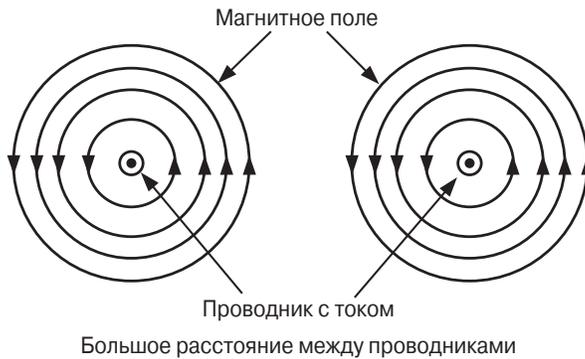
Когда ток в проводнике течёт в одном направлении, как показано на рис. 1.2а, стрелка компаса отклоняется в одну сторону. Если изменить направление тока, стрелка будет отклоняться в другую сторону (рис. 1.2б). Это доказывает, что магнитное поле полярно. Когда ток меняет направление, магнитодвижущая сила тоже меняет направление.



**Рис. 1.2.** Компас иллюстрирует изменение полярности магнитного поля

### 1.3. Усиление магнитного поля

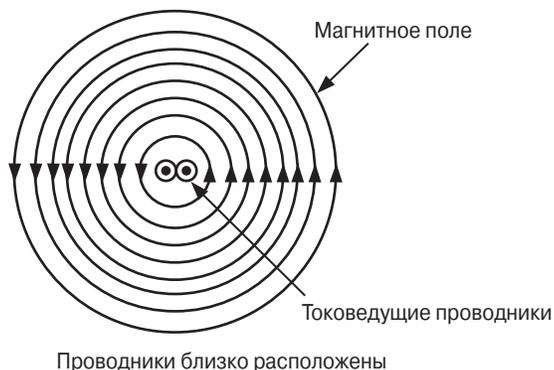
Когда ток течёт по проводнику, магнитное поле возникает вокруг провода. Если два проводника проводят ток в одном направлении, но они расположены относительно далеко друг от друга, как показано на **рис. 1.3**, генерируемые ими магнитные поля не взаимодействуют.



**Рис. 1.3.** Магнитные поля, возникающие вокруг свободных токоведущих проводников

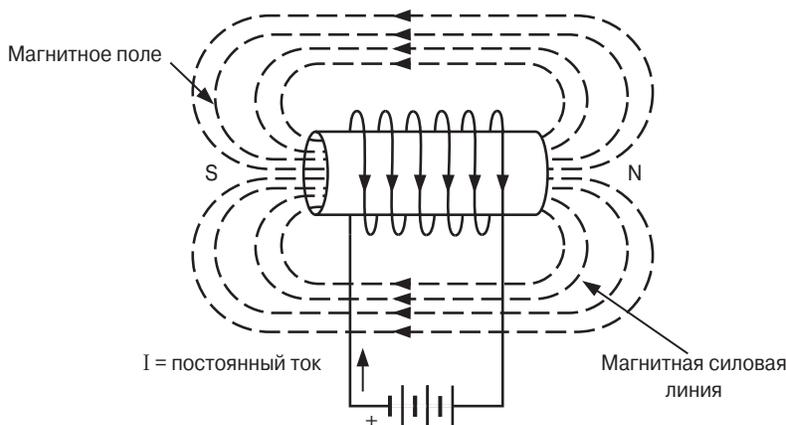
Если же проводники расположены рядом, как показано на **рис. 1.4**, магнитные поля складываются и интенсивность поля удваивается.

$$\text{Плотность энергии } \gamma = \frac{B^2}{8\pi c}. \quad (1.1)$$



**Рис. 1.4.** Магнитные поля, возникающие вокруг близко расположенных проводников с током

Если провод намотан на каркас, то его магнитное поле значительно усиливается. Катушка фактически имеет такое же поле, как у стержневого магнита, как показано на **рис. 1.5**. Как и стержневой магнит, катушка имеет северный полюс и нейтральную центральную область. Более того, полярность может быть изменена при реверсировании тока катушки  $I$ . Это опять-таки демонстрирует зависимость магнитного поля от направления тока.

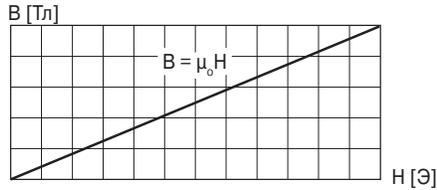


**Рис. 1.5.** Воздушная катушка с постоянным током обмотки

Магнитной цепью является пространство, в котором замыкается магнитный поток вокруг катушки. Величина потока определяется величиной тока  $I$  и числом витков катушки. Произведение  $N \cdot I$ , где  $N$  — число витков катушки, называется магнитодвижущей силой (МДС). Связь между плотностью потока  $B$  и напряжённостью магнитного поля  $H$  для воздушной катушки дана на **рис. 1.6**. Отношение  $B/H$  называется магнитной проницаемостью  $\mu_0$ . Для воздушной катушки  $\mu = 1$  в системе СГС.

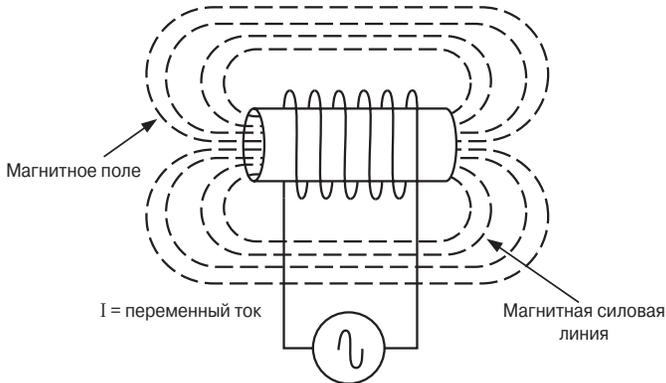
$$\mu_0 = 1. \quad (1.2.)$$

$$B = \mu_0 H \text{ [Гс/Э]}.$$

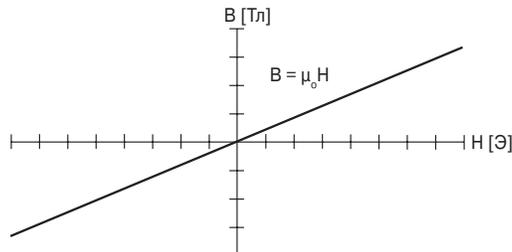


**Рис. 1.6.** Характеристика намагничивания катушки постоянным током

Если батарею, изображённую на **рис. 1.5**, заменить источником переменного напряжения, что проиллюстрировано на **рис. 1.7**, то зависимость  $B(H)$  будет иметь вид, показанный на **рис. 1.8**. Линейность зависимости  $B(H)$  – главное достоинство воздушной катушки. Ввиду линейности этой зависимости, рост  $H$  приводит к возрастанию  $B$ , и поэтому очень сильные магнитные поля могут быть получены при больших токах. Очевидно, что предельная величина тока определяется сечением провода обмотки.



**Рис. 1.7.** Воздушная катушка с возбуждением от источника переменного напряжения

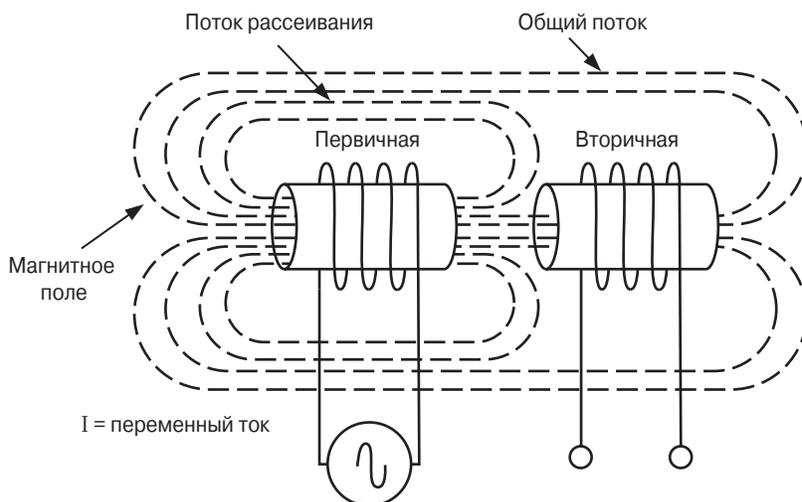


**Рис. 1.8.** Характеристика намагничивания катушки переменным током

Магнитное поле с индукцией порядка 0.1 Тл достижимо при перегреве 40 °С сверх комнатной температуры. При суперинтенсивном охлаждении можно получить поле с индукцией порядка 10 Тл.

## 1.4. Простейший трансформатор

Схема простейшего трансформатора представлена на **рис. 1.9**. Он состоит из двух воздушных катушек, охваченных общим магнитным потоком. Магнитный поток исходит из концов первичной катушки во все стороны. Обмотка первичной катушки соединена с источником переменного напряжения. Цепь обмотки вторичной катушки не замкнута. Отметим, что не все силовые линии магнитного поля являются общими для обеих катушек. Магнитный поток, не являющийся общим для обеих катушек, называется потоком рассеивания.

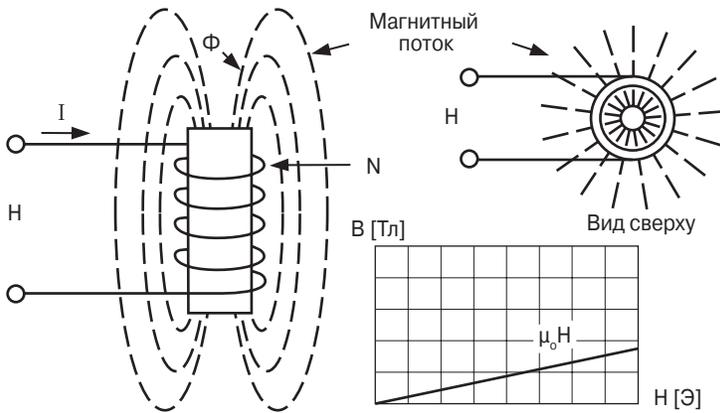


**Рис. 1.9.** Простейшая схема трансформатора

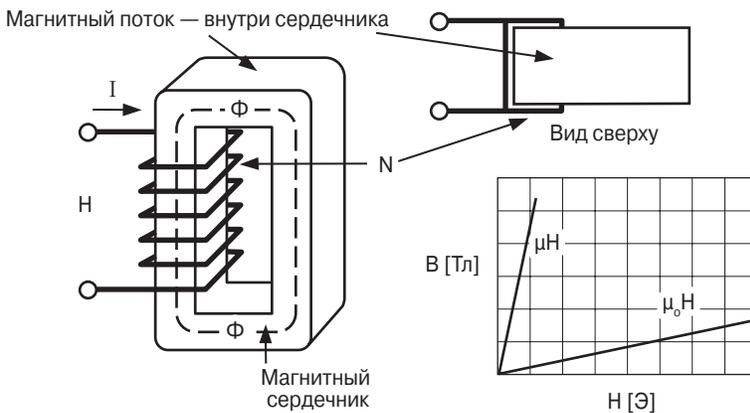
## 1.5. Магнитный сердечник

Большинство материалов — плохие проводники магнитного потока, потому что у них невысокая магнитная проницаемость. Вакуум имеет магнитную проницаемость равную 1.0, и другие немагнитные материалы, такие как воздух, бумага и медь, характеризуются проницаемостью такого же порядка. Магнитные материалы, такие как железо, никель, кобальт и их сплавы, могут иметь

магнитную проницаемость величиной до сотен тысяч. Для достижения более высоких показателей по сравнению с воздушной катушкой, показанной на **рис. 1.10**, следует ввести в катушку магнитный сердечник, как показано на **рис. 1.11**. В этом случае магнитные силовые линии распространяются по пути наименьшего сопротивления и концентрируются внутри сердечника. Существует предельная возможная величина магнитного потока, который может быть создан в данном сердечнике. Эта величина определяется насыщением сердечника. После насыщения сердечник теряет свои магнитные свойства, и катушка фактически превращается в воздушную (**рис. 1.12**).



**Рис. 1.10.** Магнитное поле воздушной катушки



**Рис. 1.11.** Магнитное поле катушки с ферромагнитным сердечником

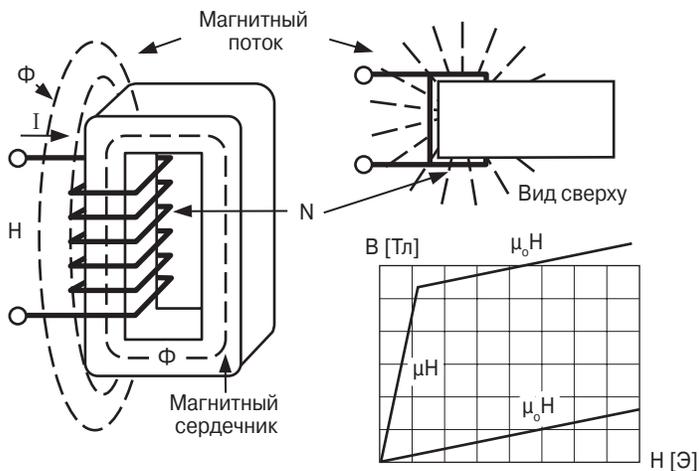


Рис. 1.12. Катушка с насыщенным сердечником

## 1.6. Фундаментальные характеристики магнитного сердечника

На рис. 1.13 представлена кривая первоначального намагничивания ферромагнитного материала. Заметно, что вначале плотность потока  $B$  растёт очень медленно до точки  $A$ , затем – очень быстро до точки  $B$  и затем перестаёт расти. Участок кривой после точки  $B$  называется «коленом» характеристики. В точке  $C$  наступает насыщение материала сердечника. В режиме насыщения справедливо соотношение (1.3).

$$\frac{\Delta B}{\Delta H} = 0. \quad (1.3)$$

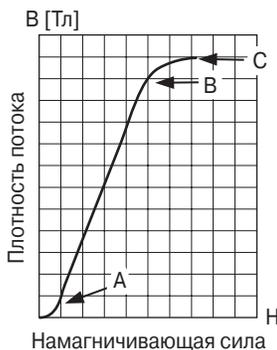
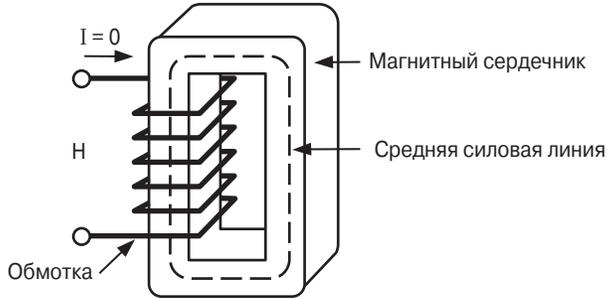


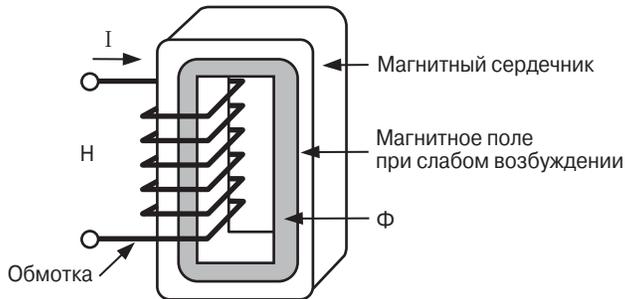
Рис. 1.13. Типичная кривая первоначального намагничивания ферромагнитного материала.

В режиме насыщения магнитная проницаемость сердечника равна магнитной проницаемости воздуха.

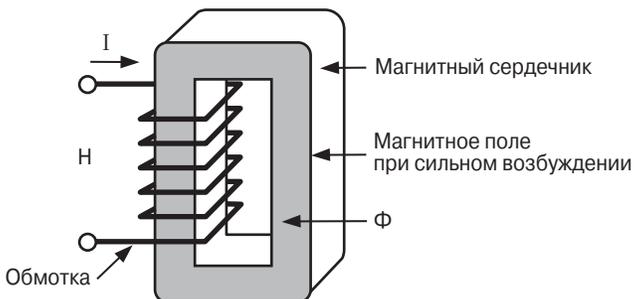
На **рис. 1.14, 1.15** и **1.16** показано, как распространяется магнитный поток в сердечнике от его внутренних областей к внешним.



**Рис. 1.14.** Не возбуждённый магнитный сердечник



**Рис. 1.15.** Слабо возбуждённый магнитный сердечник



**Рис. 1.16.** Магнитный сердечник на грани насыщения