


ЮУрГУ

С.А. Ганджа, Г.Г. Лебедев



**Э**КСПЛУАТАЦИЯ  
ПРОМЫШЛЕННОГО  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.  
**П**РАКТИЧЕСКОЕ  
РУКОВОДСТВО  
ИНЖЕНЕРА-ЭЛЕКТРИКА

Учебное пособие

**С.А. Ганджа, Г.Г. Лебедев**

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
ПРОМЫШЛЕННОГО  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.**

**ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО  
ИНЖЕНЕРА-ЭЛЕКТРИКА**

**Учебное пособие**

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2017

УДК 621.3(076.5)+621.313/35(076.5)  
Г19

*Одобрено*  
*учебно-методической комиссией энергетического факультета*

*Рецензенты:*  
*А.Б. Дунаев, Е.С. Мастюкина*

Г19 **Ганджа, С.А.**  
Эксплуатация промышленного электрооборудования. Практическое руководство инженера-электрика: учебное пособие / С.А. Ганджа, Г.Г. Лебедев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 262 с.

ISBN 978-5-696-04920-5

Учебное пособие содержит сведения по электротехнике, электрическим машинам и аппаратам, электротехническому оборудованию. Особое внимание уделено вопросам эксплуатации электроустановок и экономии электроэнергии в промышленности.

В пособии приведено большое количество примеров решения задач, что упрощает освоение материала.

Большое количество статистического материала, представленного в виде таблиц и иллюстраций, имеет практическую ценность при выборе оборудования и решении производственных задач.

Учебное пособие предназначено для инженеров-электриков и студентов электротехнических специальностей.

УДК 621.3(076.5)+621.313/35(076.5)

ISBN 978-5-696-04920-5

© Издательский центр ЮУрГУ, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 11 |
| Глава 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ  |    |
| 1.1. Международная система единиц (СИ).....  | 12 |
| 1.1.1. Эквивалент энергии и мощности.....  | 15 |
| 1.2. Основные величины и законы электротехники.....                                  | 15 |
| 1.3. Характеристика основных электротехнических материалов.....                      | 19 |
| 1.4. Допустимые температуры нагрева электрических аппаратов и<br>оборудования.....   | 23 |
| 1.5. Расчет мощности электронагревательных приборов.....                             | 23 |
| 1.6. Делители напряжения.....  | 26 |
| 1.7. Распределение тока при параллельном включении резисторов,<br>конденсаторов..... | 27 |
| 1.8. Расчет шунтов и добавочных резисторов.....                                      | 28 |
| 1.9. Определение по счетчику нагрузки потребителя.....                               | 29 |
| 1.10. Действующее, амплитудное и среднее значения переменного тока                   | 30 |
| 1.11. Резонанс напряжений и резонанс токов.....                                      | 32 |
| 1.12. Ряды напряжений, токов, частот.....  | 33 |
| Глава 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ   |    |
| 2.1. Общие сведения  |    |
| 2.1.1. Назначение.....   | 35 |
| 2.1.2. Определение, принцип действия и устройство.....                               | 35 |
| 2.1.3. Номинальные мощности силовых трансформаторов.....                             | 38 |
| 2.2. Условные обозначения трансформаторов и автотрансформаторов                      | 39 |
| 2.3. Габариты трансформаторов.....   | 40 |
| 2.4. Внешняя характеристика трансформатора.....                                      | 40 |
| 2.5. Опыт холостого хода и короткого замыкания.....                                  | 41 |
| 2.6. Потери и КПД трансформатора   |    |
| 2.6.1. Коэффициент полезного действия.....   | 43 |
| 2.6.2. Определение потерь электроэнергии в двухобмоточном транс-<br>форматоре.....   | 45 |
| 2.7. Коэффициент мощности трансформатора.....  | 45 |
| 2.8. Аналогия между трансформатором и асинхронным двигателем....                     | 49 |
| 2.9. Параллельная работа трансформаторов.....  | 50 |
| 2.10. Проверка маркировки обмоток трансформатора.....                                | 52 |
| 2.11. Группы соединений обмоток.....   | 52 |
| 2.12. Регулирование и стабилизация напряжения трансформатора.....                    | 55 |
| 2.13. Выбор силовых трансформаторов  |    |
| 2.13.1. Выбор числа трансформаторов.....   | 55 |
| 2.13.2. Выбор мощности трансформаторов.....  | 56 |
| 2.13.3. Выбор мощности трансформаторов с учетом перегрузки.....                      | 56 |

|   |    |
|---|----|
| 2.13.4. Определение мощности трансформатора с учетом потерь.....                      | 57 |
| 2.14. Определение мощности трансформатора при несимметричной нагрузке.....            | 57 |
| 2.15. Предельная мощность трансформаторов цеховых подстанций....                      | 58 |
| 2.16. Специальные трансформаторы.....   | 58 |
| 2.17. Измерительные трансформаторы.....   | 59 |
| 2.18. Сварочные трансформаторы и инверторы.....                                       | 60 |
| 2.19. Упрощенный расчет однофазного трансформатора.....                               | 61 |
| 2.20. Расчет однофазного автотрансформатора.....                                      | 66 |
| 2.21. Упрощенный расчет трехфазного трансформатора мощностью до 10 кВА.....           | 68 |
| 2.22. Допустимые мощности двигателей при прямом пуске от силовых трансформаторов..... | 70 |
| 2.23. Выбор предохранителей ПК силовых трансформаторов (6–10 кВ)                      | 71 |
| 2.24. Технические данные трансформаторов.....   | 72 |
| 2.25. Неисправности трансформаторов.....  | 73 |

### Глава 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Общие сведения по электрическим машинам                                |    |
| 3.1.1. Номинальные режимы электрических машин.....                          | 75 |
| 3.2. Основные параметры электрических машин.....                            | 76 |
| 3.3. Сопротивление изоляции обмоток.....                                    | 77 |
| 3.4. Потери мощности и КПД электрических машин.....                         | 77 |
| 3.5. Обозначение выводов обмоток (ГОСТ 183).....                            | 78 |
| 3.6. Номинальные частоты вращения электрических машин (ГОСТ 10683).....     | 79 |
| 3.7. Классификация электрических машин.....                                 | 80 |
| 3.8. Воздушные зазоры электрических машин                                   |    |
| 3.8.1. Воздушные зазоры асинхронных машин.....                              | 82 |
| 3.8.2. Воздушные зазоры синхронных машин.....                               | 82 |
| 3.8.3. Воздушные зазоры машин постоянного тока.....                         | 82 |
| 3.9. Фазирование электрических машин.....                                   | 83 |
| 3.10. Определение межвитковых замыканий в обмотках электрических машин..... | 84 |
| 3.11. Асинхронные электродвигатели (АД)                                     |    |
| 3.11.1. Общие сведения.....   | 85 |
| 3.11.2. Основные типы АД.....   | 86 |
| 3.11.3. Скорость вращения и скольжение.....                                 | 87 |
| 3.11.4. Основные параметры АД.....  | 88 |
| 3.11.5. Опыт холостого хода.....  | 89 |
| 3.11.6. Опыт короткого замыкания.....                                       | 90 |
| 3.11.7. Коэффициент полезного действия АД.....                              | 91 |
| 3.11.8. Реактивная мощность АД.....   | 92 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.11.9. Коэффициент мощности АД.....  | 93  |
| 3.11.9.1. Коэффициент мощности АД при пуске.....  | 93  |
| 3.11.9.2. Коэффициент мощности АД при нагрузке.....   | 94  |
| 3.11.10. Вращающий момент АД.....   | 95  |
| 3.11.11. Механическая характеристика АД.....  | 96  |
| 3.11.12. Пуск АД.....   | 98  |
| 3.11.12.1. Тиристорные преобразователи напряжения для пуска АД  | 100 |
| 3.11.13. Ток холостого хода АД.....   | 101 |
| 3.11.14. Соединение обмоток в «звезду» и «треугольник» (Y и Δ).....                                       | 101 |
| 3.11.15. Допустимая плотность тока в обмотках статора.....  | 103 |
| 3.11.16. Допустимое число включений АД с короткозамкнутым ротором.....                                    | 103 |
| 3.11.17. Трехфазный АД на двух фазах.....   | 104 |
| 3.11.18. Трехфазный АД в однофазной сети.....   | 105 |
| 3.11.19. Двухфазный АД.....   | 107 |
| 3.11.20. Однофазный АД.....   | 108 |
| 3.11.21. Некоторые данные асинхронных двигателей серии А2 и А02...  | 108 |
| 3.11.22. Трехфазные крановые асинхронные электродвигатели серий МТ и МТК.....                             | 109 |
| 3.11.23. Трехфазные асинхронные короткозамкнутые электродвигатели серии ВАО.....                          | 110 |
| 3.11.24. Трехфазные асинхронные короткозамкнутые электродвигатели единой серии 4А.....                    | 111 |
| 3.11.25. Асинхронные электродвигатели серии АИ.....   | 114 |
| 3.11.26. Технические данные однофазных асинхронных электродвигателей серии АОЛБ.....                      | 115 |
| 3.11.27. Самозапуск АД.....   | 115 |
| 3.11.28. Самовозбуждение АД.....  | 116 |
| 3.11.29. Регулирование скорости вращения АД.....  | 117 |
| 3.11.30. Расчет пусковых сопротивлений АД с фазным ротором.....   | 119 |
| 3.11.31. Определение начала и конца обмоток.....  | 121 |
| 3.11.32. Определение параметров АД при отсутствии паспорта.....   | 122 |
| 3.11.32.1. Определение номинальной мощности на валу.....  | 122 |
| 3.11.32.2. Определение номинальных нагрузок, потребляемых из сети   | 123 |
| 3.11.32.3. Определение параметров холостого хода.....   | 126 |
| 3.11.32.4. Определение параметров при произвольной нагрузке.....  | 128 |
| 3.11.33. Определение коэффициента загрузки АД методом амперметра.....                                     | 130 |
| 3.11.34. Пересчет обмоток.....  | 131 |
| 3.11.35. Несимметричные режимы работы АД  |     |
| 3.11.35.1. Обрыв одной фазы сети при изолированной нейтрали обмотки статора АД, соединенного звездой..... | 133 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.11.35.2. Обрыв одного из линейных проводов при соединении обмотки статора треугольником.....       | 134 |
| 3.11.35.3. Обрыв фаз при соединении нулевых точек источника питания и обмотки статора двигателя..... | 134 |
| 3.11.36. Специальные режимы асинхронных машин  |     |
| 3.11.36.1. Асинхронный генератор (АГ).....   | 135 |
| 3.11.36.2. Электромагнитный тормоз.....  | 136 |
| 3.11.36.3. Индукционный регулятор.....   | 136 |
| 3.11.37. Неисправности АД.....   | 137 |
| 3.12. Синхронные двигатели (СД)  |     |
| 3.12.1. Общие сведения о синхронной машине.....  | 137 |
| 3.12.2. Разновидности синхронных машин.....  | 140 |
| 3.12.3. Влияние тока возбуждения на работу СД.....   | 141 |
| 3.12.4. Компенсирующая способность СД.....   | 142 |
| 3.12.5. Технические данные СД.....   | 142 |
| 3.12.6. Неисправности СД.....  | 143 |
| 3.13. Машины постоянного тока  |     |
| 3.13.1. Общие сведения.....  | 144 |
| 3.13.2. Пуск электродвигателей постоянного тока.....   | 146 |
| 3.13.3. Электродвигатели серии 2П.....   | 147 |
| 3.13.4. Неисправности электродвигателей постоянного тока   |     |
| 3.13.4.1. Искрение щеток.....  | 149 |
| 3.13.4.2. Перегрев машины.....   | 149 |
| 3.13.4.3. Перегрев обмотки якоря.....  | 149 |
| 3.13.4.4. Перегрев коллектора и щеток.....   | 149 |
| 3.13.4.5. Перегрев обмотки возбуждения.....  | 149 |
| 3.13.4.6. Двигатель не идет в ход.....   | 149 |
| Глава 4. ЭЛЕКТРОПРИВОД   |     |
| 4.1. Механические характеристики электродвигателей.....  | 150 |
| 4.2. Расчет мощности электродвигателей при продолжительном режиме                                    | 150 |
| Глава 5. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ   |     |
| 5.1. Краткие сведения о вентилях.....  | 152 |
| 5.2. Технические данные диодов.....  | 152 |
| 5.3. Схемы выпрямления.....  | 154 |
| 5.4. Вентили с удвоенным напряжением.....  | 155 |
| 5.5. Краткие сведения о тиристорах.....  | 156 |
| 5.6. Технические данные тиристоров.....  | 157 |
| 5.7. Перегрузочная способность тиристоров по току.....   | 158 |
| 5.8. Температурный режим работы силовых тиристоров.....  | 159 |
| 5.9. Групповые включения полупроводниковых приборов.....   | 159 |
| 5.10. Высокочастотные установки  |     |
| 5.10.1. Преобразователи частоты.....   | 161 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.11. Технические данные тиристорных преобразователей частоты для электротехнических установок..... | 164 |
| 5.12. Электросварочное оборудование.....  | 165 |
| 5.13. Компрессорные установки.....  | 166 |
| 5.14. Электрическое освещение   |     |
| 5.14.1. Рациональное использование освещения.....   | 167 |
| 5.14.2. Обслуживание осветительных установок.....   | 168 |
| 5.14.3. Три уровня яркости горения ламп.....  | 169 |
| 5.14.4. Ремонт люминесцентной лампы.....  | 169 |
| 5.14.5. Технические данные ламп накаливания, люминесцентных и ДРЛ.....                              | 170 |
| 5.14.6. Расчет освещения  |     |
| 5.14.6.1. Расчет осветительной установки методом удельной мощности.....                             | 173 |
| 5.14.6.2. Расчет сигнальных ламп.....   | 174 |
| 5.14.7. Энергоэффективные источники света.....  | 175 |
| 5.15. Аккумуляторные батареи  |     |
| 5.15.1. Обозначение и характеристика стартерных батарей.....  | 176 |
| 5.15.2. Электролит.....   | 177 |
| 5.15.3. Методы заряда аккумуляторных батарей.....   | 178 |
| 5.15.4. Расчет мощности зарядных устройств.....   | 178 |
| 5.15.5. Неисправности аккумуляторных батарей.....   | 180 |
| 5.16. Электромеханизмы  |     |
| 5.16.1. Электромагниты постоянного тока серии ЭМ21.....   | 181 |
| 5.16.2. Электромагниты постоянного тока серии КМП.....  | 181 |
| 5.16.3. Электромагниты однофазные переменного тока напряжением 127, 220, 380 и 500 В серии МИС..... | 182 |
| 5.16.4. Электромагниты переменного тока серии КМТ нормального исполнения.....                       | 183 |
| 5.16.5. Муфты электромагнитные серии ЭМ постоянного тока напряжением 24 В.....                      | 183 |
| 5.16.6. Муфты электромагнитные серии МПБ, ЭМ и ЭТМ.....   | 184 |
| 5.16.7. Контактные путевые выключатели.....   | 184 |
| 5.16.8. Бесконтактные путевые переключатели серии БВК.....  | 184 |
| 5.16.9. Электрогидравлические толкатели.....  | 185 |
| <b>Глава 6. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ</b>   |     |
| 6.1. Показатели качества напряжения.....  | 186 |
| 6.2. Влияние режима напряжения на работу приемников электроэнергии.....                             | 187 |
| 6.3. Особенности реактивной мощности.....   | 190 |
| 6.4. Способы повышения коэффициента мощности токоприемников... ..                                   | 192 |
| 6.5. Конденсаторные установки (КУ).....   | 194 |

|   |     |
|---|-----|
| Глава 7. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ   |     |
| 7.1. Рубильники, переключатели и пакетные выключатели.....                              | 197 |
| 7.2. Предохранители.....  | 198 |
| 7.3. Контактторы.....   | 202 |
| 7.4. Магнитные пускатели переменного тока.....  | 204 |
| 7.5. Тиристорные пускатели.....   | 206 |
| 7.6. Автоматические выключатели.....  | 208 |
| 7.7. Проверка исправности основных элементов электрических схем...                      | 209 |
| 7.8. Включение катушек контакторов переменного тока на постоянный ток.....              | 215 |
| 7.9. Реле времени.....  | 216 |
| 7.10. Схема защиты минимального напряжения.....   | 217 |
| Глава 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ, ПРОВОДА И КАБЕЛИ   |     |
| 8.1. Передача электроэнергии.....   | 219 |
| 8.2. Расчет линий трехфазного тока.....   | 220 |
| 8.3. Электропередачи постоянного тока.....  | 220 |
| 8.4. Расчет проводов и кабелей.....   | 221 |
| 8.5. Определение параметров трехфазных цепей при различных режимах                      |     |
| 8.5.1. Четырехпроводная система.....  | 229 |
| 8.5.2. Трехпроводная система.....   | 230 |
| 8.6. Нагрузочная способность параллельно включенных кабелей различной проводимости..... | 232 |
| Глава 9. ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ                                       |     |
| 9.1. Электрические сети   |     |
| 9.1.1. Определение потерь в линиях и сетях.....   | 234 |
| 9.1.2. Перевод электрических сетей на повышенное напряжение.....                        | 234 |
| 9.1.3. Реконструкция сетей.....   | 235 |
| 9.1.4. Включение резервных линий электропередачи.....                                   | 235 |
| 9.1.5. Повышение коэффициента мощности электроустановок.....                            | 235 |
| 9.2. Трансформаторы   |     |
| 9.2.1. Определение потерь электроэнергии в двухобмоточном трансформаторе.....           | 235 |
| 9.2.2. Экономичный режим работы трансформаторов.....                                    | 236 |
| 9.3. Электродвигатели.....  | 237 |
| 9.4. Электродвигатели сопротивления.....  | 238 |
| 9.5. Преобразователи повышенной частоты   |     |
| 9.5.1. Замена машинных преобразователей статическими преобразователями.....             | 239 |
| 9.5.2. Снижение потерь электроэнергии в силовых кабелях.....                            | 240 |
| 9.6. Экономия электроэнергии при выработке и использовании сжатого воздуха              |     |

|  |     |
|--|-----|
| 9.6.1. Снижение номинального рабочего давления компрессорной установки.....                                  | 240 |
| 9.6.2. Внедрение прямоточных клапанов в поршневых компрессорах...  | 241 |
| 9.6.3. Подогрев сжатого воздуха перед пневмоприемниками.....   | 241 |
| 9.6.4. Замена компрессоров старых конструкций на новые с более высокими КПД.....                             | 241 |
| 9.6.5. Сокращение утечек сжатого воздуха.....  | 242 |
| 9.7. Насосные установки  |     |
| 9.7.1. Повышение КПД насосов.....  | 242 |
| 9.7.2. Улучшение загрузки насосов и совершенствование регулирования их работы.....                           | 242 |
| 9.7.3. Сокращение расхода и потерь воды.....   | 243 |
| 9.8. Вентиляционные установки  |     |
| 9.8.1. Замена вентиляторов старых типов на современные вентиляторы   | 244 |
| 9.8.2. Внедрение экономичных способов регулирования подачи вентиляторов.....                                 | 245 |
| 9.8.3. Блокировка вентиляторов тепловых завес с устройствами открывания и закрывания ворот.....              | 245 |
| 9.8.4. Улучшение работы вентиляторов.....  | 245 |
| 9.8.5. Внедрение автоматического управления вентиляционными установками.....                                 | 246 |
| 9.9. Электросварочные установки  |     |
| 9.9.1. Оптимальный выбор способа электросварки.....  | 246 |
| 9.9.2. Устранение или сокращение холостого хода сварочных агрегатов.....                                     | 247 |
| 9.9.3. Совершенствование технологии электросварки.....   | 247 |
| 9.10. Рациональное использование осветительных установок   |     |
| 9.10.1. Правильный выбор типа ламп и светильников.....   | 248 |
| 9.10.2. Включение источников света в дневное время.....  | 250 |
| 9.10.3. Загрязнение светильников.....  | 251 |
| 9.10.4. Поддержание номинальных уровней напряжения в осветительной сети.....                                 | 252 |
| 9.11. Экономия электроэнергии при эксплуатации электрифицированного транспорта                               |     |
| 9.11.1. Внедрение рекуперативного торможения электровозов.....   | 253 |
| 9.11.2. Влияние использования подвижного состава на расход электроэнергии на железнодорожном транспорте..... | 253 |
| 9.11.3. Снижение пусковых (реостатных) потерь электроэнергии в трамвае и троллейбусе.....                    | 254 |
| 9.11.4. Внутрицеховой и межцеховой транспорт.....  | 254 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....  | 255 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ   |     |

|   |     |
|---|-----|
| П. 1. Форматы и масштабы.....   | 258 |
| П. 2. Тригонометрические функции острого угла.....  | 258 |
| П. 3. Зависимость потерь холостого хода от номинальной мощности асинхронных двигателей.....   | 259 |
| П. 4. Выбор длины (в м) и диаметра (в мм) нихромовой проволоки электронагревательных элементов ( $U = 220 \text{ В}$ ).....         | 260 |
| П. 5. Расчет параметров статических конденсаторов для разных схем подключения при напряжении $U = 0,22\text{--}10 \text{ кВ}$ ..... | 261 |
| П. 6. Параметры конденсаторов типа ЭСВ.....   | 262 |
| П. 7. Электрические параметры тиристорных преобразователей частоты в номинальном режиме.....  | 262 |

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возникла необходимость усилить практическую подготовку специалистов с высшим образованием по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Наметившийся разрыв между академическими университетами и промышленными предприятиями отрицательно сказывается и на прикладной науке, и на развитии производства. На Энергетическом факультете Южно-Уральского государственного университета делается многое для того, чтобы учебный процесс стал практикоориентированным. Это производственные и преддипломные практики на будущих рабочих местах выпускников, получение рабочих специальностей, выполнение курсовых и дипломных работ по заданиям с промышленных предприятий.

Предлагаемое практическое руководство является еще одним шагом для приближения учебного процесса к реальному производству. В нем собран большой практический опыт с промышленных предприятий Челябинской области. При выборе разделов составители исходили из своего опыта работы в промышленности, уделяя внимание вопросам, чаще всего возникающим в повседневной практике электрика.

Руководство содержит материалы следующего характера:

1. Наиболее важные термины и их определение.
2. Вопросы эксплуатации силовых трансформаторов, асинхронных двигателей, синхронных двигателей, двигателей постоянного тока и других типов промышленного электрооборудования.
3. Формулы и примерные расчеты при определении параметров для различных режимов работы электроустановок.
4. Справочные данные по электрооборудованию.
5. Вопросы экономии электроэнергии в промышленности.

В процессе подготовки руководства были использованы материалы «Электротехнического справочника», производственно-технических журналов «Промышленная энергетика» и другой технической литературы по эксплуатации промышленного оборудования.

Большое количество примеров, связанных с реальным производством, может быть интересным и полезным как для студентов по электротехническим профилям подготовки, так и для специалистов со средним и высшим образованием, чья деятельность связана с эксплуатацией и выбором производственного оборудования.

Все замечания и предложения просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, 76, Энергетический факультет Политехнического института Южно-Уральского государственного университета.

## Глава 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

### 1.1. Международная система единиц (СИ)

Международная система единиц СИ состоит из 7 основных и 2 дополнительных единиц. Кроме основных и дополнительных в состав СИ входят также 22 важнейшие производные единицы из различных областей науки. В настоящее время система СИ является основной системой единиц в мире (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Международная система единиц (СИ). Основные величины

| Величина                      |                    | Единица      |                            |             |               |
|-------------------------------|--------------------|--------------|----------------------------|-------------|---------------|
| Наименование                  | Символ размерности | Наименование |                            | Обозначение |               |
|                               |                    | русское      | французское/<br>английское | русское     | международное |
| Длина                         | L                  | метр         | mètre/metre                | м           | m             |
| Масса                         | M                  | килограмм    | kilogramme/kilogram        | кг          | kg            |
| Время                         | T                  | секунда      | seconde/second             | с           | s             |
| Сила электрического тока      | I                  | ампер        | ampère/ampere              | А           | A             |
| Термодинамическая температура | Θ                  | кельвин      | kelvin                     | К           | K             |
| Количество вещества           | N                  | моль         | mole                       | моль        | mol           |
| Сила света                    | J                  | кандела      | candela                    | кд          | cd            |

Таблица 1.1.1

Международная система единиц (СИ). Дополнительные величины

| Величина      | Единица   | Обозначение |
|---------------|-----------|-------------|
| Плоский угол  | радиан    | рад         |
| Телесный угол | стерадиан | ср          |

Таблица 1.1.2

Производные единицы, имеющие специальные наименования и обозначения

| Величина            | Единица              |   | Обозначение |               | Выражение через основные единицы |
|---------------------|----------------------|---|-------------|---------------|----------------------------------|
|                     | русское наименование | французское/<br>английское наименование | русское     | международное |                                  |
| 1                   | 2                    | 3                                       | 4           | 5             | 6                                |
| Температура Цельсия | градус Цельсия       | degré Celsius/<br>degree Celsius        | °C          | °C            | K                                |
| Частота             | герц                 | hertz                                   | Гц          | Hz            | c <sup>-1</sup>                  |

Окончание табл. 1.1.2

| Величина  | Единица                   |  | Обозначение  |                         | Выражение<br>через основные<br>единицы   |
|---|---------------------------|--|--------------|-------------------------|--|
|   | русское на-<br>именование | французское/<br>английское<br>наименование | рус-<br>ское | между-<br>народ-<br>ное |  |
| 1   | 2                         | 3  | 4            | 5                       | 6  |
| Сила  | ньютон                    | newton                                     | Н            | N                       | $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$   |
| Энергия   | джоуль                    | joule                                      | Дж           | J                       | $\text{Н} \cdot \text{м} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$                         |
| Мощность  | ватт                      | watt                                       | Вт           | W                       | $\text{Дж}/\text{с} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$                              |
| Давление  | паскаль                   | pascal                                     | Па           | Pa                      | $\text{Н}/\text{м}^2 = \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$                          |
| Световой<br>поток                                       | люмен                     | lumen                                      | лм           | lm                      | кд·ср  |
| Освещён-<br>ность                                       | люкс                      | lux  | лк           | lx                      | $\text{лм}/\text{м}^2 = \text{кд} \cdot \text{ср}/\text{м}^2$                                      |
| Электриче-<br>ский заряд                                | кулон                     | coulomb                                    | Кл           | C                       | A·с  |
| Разность по-<br>тенциалов                               | вольт                     | volt                                       | В            | V                       | $\text{Дж}/\text{Кл} =$<br>$= \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$  |
| Сопротивле-<br>ние                                      | ом                        | ohm  | Ом           | $\Omega$                | $\text{В}/\text{А} =$<br>$= \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$    |
| Електроём-<br>кость                                     | фарад                     | farad                                      | Ф            | F                       | $\text{Кл}/\text{В} =$<br>$= \text{с}^4 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ |
| Магнитный<br>поток                                      | вебер                     | weber                                      | Вб           | Wb                      | $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$                               |
| Магнитная<br>индукция                                   | тесла                     | tesla                                      | Тл           | T                       | $\text{Вб}/\text{м}^2 = \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$                         |
| Индуктив-<br>ность                                      | генри                     | henry                                      | Гн           | H                       | $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$                               |
| Электриче-<br>ская прово-<br>димость                    | сименс                    | siemens                                    | См           | S                       | $\text{Ом}^{-1} =$<br>$= \text{с}^3 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$     |
| Активность<br>радиоактив-<br>ного источ-<br>ника        | беккерель                 | becquerel                                  | Бк           | Bq                      | $\text{с}^{-1}$  |
| Поглощён-<br>ная доза ио-<br>низирующе-<br>го излучения | грей                      | gray                                       | Гр           | Gy                      | $\text{Дж}/\text{кг} = \text{м}^2/\text{с}^2$  |
| Эффектив-<br>ная доза ио-<br>низирующе-<br>го излучения | зиверт                    | sievert                                    | Зв           | Sv                      | $\text{Дж}/\text{кг} = \text{м}^2/\text{с}^2$  |
| Активность<br>катализатора                              | катал                     | katal                                      | кат          | kat                     | моль/с   |

Таблица 1.1.3

Некоторые единицы, не входящие в СИ, по решению ГКМВ  
(допускаются для использования совместно с СИ)

| Единица                        | Французское/<br>английское<br>наименование                                | Обозначение  |                     | Величина<br>в единицах СИ                    |
|--------------------------------|---|--------------|---------------------|--|
|                                |   | рус-<br>ское | междуна-<br>родное  |  |
| 1                              | 2   | 3            | 4                   | 5  |
| Минута                         | minute  | мин          | min                 | 60 с   |
| Час                            | heure/hour  | ч            | h                   | 60 мин = 3600 с                              |
| Сутки                          | jour/day  | сут          | d                   | 24 ч = 86 400 с                              |
| Угловой градус                 | degré/degree  | °            | °                   | ( $\pi/180$ ) рад                            |
| Угловая минута                 | minute  | '            | '                   | $(1/60)^\circ = (\pi/10\,800)$               |
| Угловая секунда                | seconde/second  | "            | "                   | $(1/60)' = (\pi/648\,000)$                   |
| Литр                           | litre   | л            | l, L                | 0,001 м <sup>3</sup>                         |
| Тонна                          | tonne   | т            | t                   | 1000 кг                                      |
| Непер                          | neper   | Нп           | Np                  | безразмерна                                  |
| Бел                            | bel   | Б            | B                   | безразмерна                                  |
| Электронвольт                  | electronvolt  | эВ           | eV                  | $\approx 1,602\,177\,33 \cdot 10^{-19}$ Дж   |
| Атомная единица массы, дальтон | unité de masse atomique unifiée, dalton/ unified atomic mass unit, dalton | а. е. м.     | u, Da               | $\approx 1,660\,540\,2 \cdot 10^{-27}$ кг    |
| Астрономическая единица        | unité astronomique/ astronomical unit                                     | а. е.        | au                  | 149 597 870 700 м (точно) <sup>[2][23]</sup> |
| Морская миля                   | mille marin/ nautical mile  | миля         | M <sup>[K 7]</sup>  | 1852 м (точно)                               |
| Узел                           | nœud/knot   | уз           | kn <sup>[K 7]</sup> | 1 морская миля в час = (1852/3600) м/с       |
| Ар                             | are   | а            | a                   | 100 м <sup>2</sup>                           |
| Гектар                         | hectare   | га           | ha                  | 10000 м <sup>2</sup>                         |
| Бар                            | bar   | бар          | bar                 | 100000 Па                                    |
| Ангстрем                       | ångström  | Å            | Å                   | 10 <sup>-10</sup> м                          |
| Барн                           | barn  | б            | b                   | 10 <sup>-28</sup> м <sup>2</sup>             |

Наименования десятичных кратных и дольных единиц образуются путем присоединения соответствующих приставок к наименованиям исходных единиц. Наименования и обозначения приставок приведены в табл. 1.1.4.

Таблица 1.1.4

#### Приставки к единицам измерения

| Множитель        | Приставка | Обозначение |
|------------------|-----------|-------------|
| 10 <sup>12</sup> | тера      | Т           |
| 10 <sup>9</sup>  | гига      | Г           |
| 10 <sup>6</sup>  | мега      | М           |
| 10 <sup>3</sup>  | кило      | К           |
| 10 <sup>2</sup>  | (гекто)   | Г           |
| 10 <sup>1</sup>  | (дека)    | ДА          |

| Множитель  | Приставка | Обозначение |
|------------|-----------|-------------|
| $10^{-1}$  | (деци)    | д           |
| $10^{-2}$  | (санتي)   | с           |
| $10^{-3}$  | милли     | м           |
| $10^{-6}$  | микро     | мк          |
| $10^{-9}$  | нано      | н           |
| $10^{-12}$ | пико      | п           |
| $10^{-15}$ | фемто     | ф           |
| $10^{-18}$ | атто      | а           |

*Примечание.* В скобках даны приставки для единиц широкого распространения (гектар, декалитр, дециметр, сантиметр).

### 1.1.1. Эквивалент энергии и мощности

#### Энергия, работа

- $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 367000 \text{ кгм} = 860 \text{ ккал};$   
 $1 \text{ л.с.}\cdot\text{ч} = 270000 \text{ кгм} = 633 \text{ ккал};$   
 $1 \text{ ккал} = 427 \text{ кгм} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}\cdot\text{ч};$   
 $1 \text{ кгм} = 2,72 \cdot 10^{-6} \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ ккал}.$

#### Мощность

- $1 \text{ кВт} = 102 \text{ кгм/с} = 1,36 \text{ л.с.} = 0,24 \text{ ккал/с};$   
 $1 \text{ л.с.} = 75 \text{ кгм/с} = 0,736 \text{ кВт} = 0,176 \text{ ккал/с};$   
 $1 \text{ кгм/с} = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} = 0,0133 \text{ л.с.} = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ ккал/с};$   
 $1 \text{ ккал/с} = 427 \text{ кгм/с} = 4,18 \text{ кВт} = 5,69 \text{ л.с.};$   
 $1 \text{ ккал/ч} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}.$

### 1.2. Основные величины и законы электротехники

В практических расчетах часто возникает необходимость в определении ряда электрических величин, характеризующих работу приемников электрической энергии. Они могут быть определены на основании законов и формул.

#### Сопротивление

**Омическое сопротивление проводника при постоянном токе, Ом:**

$$r_o = \rho \frac{\ell}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  
 $\ell$  – длина, м;  
 $S$  – сечение, мм<sup>2</sup>.

**Активное сопротивление проводника при переменном токе, Ом:**

$$r = \mathcal{K}r_o,$$

где  $\mathcal{K}$  – коэффициент, учитывающий поверхностный эффект, а в магнитных проводниках явление намагничивания ( $\mathcal{K} \approx 1,05 \div 1,2$ );

$r_0$  – омическое сопротивление, Ом.

**Зависимость омического сопротивления проводника от температуры, Ом:**

$$r_2 = r_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)],$$

где  $r_2, r_1$  – сопротивление проводника соответственно при температурах  $t_2$  и  $t_1$ , Ом;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

**Сопротивление 1 км провода в зависимости от температуры:**

для меди:

$$r \approx \frac{18 \pm 0,08t}{S};$$

для алюминия:

$$r \approx \frac{29 \pm 0,12t}{S},$$

где  $S$  – сечение, мм<sup>2</sup>,

$t$  – температура, °С.

**Индуктивное (реактивное) сопротивление, Ом:**

$$X_L = \omega L = 2\pi fL,$$

где  $\omega$  – угловая скорость при частоте  $f = 50$  Гц ( $\omega = 314$ );

$L$  – коэффициент самоиндукции (индуктивность), Гн.

**Емкостное (реактивное) сопротивление, Ом:**

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC},$$

где  $C$  – емкость, Ф.

**Полное реактивное сопротивление, Ом:**

$$X = X_L - X_C,$$

где  $X_L, X_C$  – индуктивное и емкостное сопротивления, Ом.

**Полное сопротивление, Ом:**

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

**Общее сопротивление цепи при последовательном соединении нескольких ( $n$ ) сопротивлений, Ом:**

$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_n,$$

где  $r_1, r_2, r_n$  – отдельные сопротивления, Ом.

**Общее сопротивление цепи из двух параллельных ветвей, Ом:**

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}.$$

**Общее сопротивление цепи из нескольких  $n$  параллельных ветвей, Ом:**

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}},$$

где  $r_1, r_2, r_n$  – сопротивления отдельных параллельных ветвей, Ом.

### **Емкость**

**Общая емкость цепи при последовательном соединении нескольких  $n$  емкостей, Ф:**

$$C = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n}}.$$

**Общая емкость цепи при параллельном соединении нескольких емкостей, Ф:**

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n,$$

где  $C_1, C_2, C_n$  – отдельные емкости, Ф.

### **Закон Ома**

1. Для участка цепи:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}}.$$

2. Для полной цепи:

$$I = \frac{E}{r_0 + r},$$

где  $I$  – ток в цепи, А;

$U$  – напряжение в цепи, В;

$r, X, Z$  – активное, индуктивное, полное сопротивления цепи, Ом;

$(r_0 + r)$  – сумма внутреннего и внешнего сопротивлений, Ом;

$E$  – ЭДС, В.

### **Закон Кирхгофа**

1. Для узла (I закон):

$$\sum_{i=1}^{i=n} I_i = 0.$$

2. Для замкнутого контура (II закон):

$$E = \sum U = \sum Ir,$$

где  $I$  – токи в отдельных ответвлениях, сходящихся в одной точке, А ( $i = 1, 2, \dots n$ );

$E$  – ЭДС в контуре, В;

$U$  – напряжение на участке, В;

$r$  – сопротивление отдельных участков, Ом.

### Эффекты тока

**1. Электродинамический эффект тока для двух параллельных проводников:**

$$F = 2,04 i_1 i_2 \frac{\ell}{a} \cdot 10^{-8},$$

где  $F$  – сила, действующая на  $\ell$  см длины проводника, кгс С в системе СИ 1 кгс = 9,8 Н;

$i_1, i_2$  – амплитудные значения токов в параллельных проводниках, А;

$\ell$  – длина проводника, см;

$a$  – расстояние между проводниками, см.

**2. Тепловой эффект тока:**

$$Q = 0,24 I^2 r t = 0,24 U I t,$$

где  $Q$  – количество тепла, кал (0,24 кал  $\approx$  1 Втс; 860 кал  $\approx$  1 кВт·ч);

$t$  – время протекания тока, с;

$I$  – ток, А;

$r$  – сопротивление, Ом.

**3. Химический эффект тока:**

$$A = \alpha I t,$$

где  $A$  – количество вещества, отложившегося на электроде, мГ;

$\alpha$  – электрохимический эквивалент вещества;

$I$  – ток, А;

$t$  – время протекания тока, с.

### Мощность

**Постоянный ток:**

$$P = U \cdot I = I^2 r = \frac{U^2}{r},$$

где  $P$  – мощность, Вт;

$U$  – напряжение, В;

$I$  – ток, А;

$r$  – сопротивление, Ом.

**Однофазный ток:**

$$P = UI \cos \varphi;$$

$$Q = UI \sin \varphi.$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

**Трехфазный ток:**

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi;$$

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi;$$

$$S = \sqrt{3}UI,$$

где  $P$  – активная мощность, Вт;

$Q$  – реактивная мощность, ВАр;

$S$  – полная мощность, ВА.

**Мощность на валу трехфазного электродвигателя:**

$$P_2 = \sqrt{3}UI \cos \varphi \eta,$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия.

**Коэффициент мощности:**

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{U_a}{U} = \frac{I_a}{I} = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Q^2}{P^2}}}.$$

### 1.3. Характеристика основных электротехнических материалов

К электротехническим материалам относятся:

- 1) электроизоляционные;
- 2) проводниковые;
- 3) полупроводниковые;
- 4) мягкие материалы.

Все электроизоляционные материалы по нагревостойкости делятся на следующие классы (по ГОСТ 8865):

$У$  – материалы из непропитанных и не погруженных в жидкий диэлектрик волокнистых материалов: целлюлоза, хлопок, шелк ( $t_{пред} = 90$  °С);

$А$  – это материалы класса  $У$ , пропитанные или погруженные в жидкий диэлектрик ( $t_{пред} = 105$  °С);

$Е$  – некоторые синтетические пленки, волокна, смолы, компаунды и др. материалы ( $t_{пред} = 120$  °С);

$В$  – материалы на основе слюды, асбеста, стекловолкна, изготовленные с применением органических связующих материалов: миканит, стеклоткань, асбестовая бумага и др. материалы ( $t_{пред} = 130$  °С);

$Ф$  – материалы класса  $В$  в сочетании с синтетическими связующими ( $t_{пред} = 155$  °С);

$Н$  – материалы класса  $В$  в сочетании с кремний-органическими связующими и пропитывающими составами ( $t_{пред} = 180$  °С);

С – слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов и материалов органического происхождения ( $t_{пред.} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Изоляция класса У в электромашиностроении почти не применяется, а изоляция С применяется редко [23, 54].

Технические данные некоторых изоляционных материалов приведены в табл. 1.3.1.

Таблица 1.3.1

Технические данные изоляционных материалов

| № п/п | Материал               | Плотность г/см <sup>3</sup> | Эл. прочность при 20 °С, кВ/мм             | tg(δ) при 50 Гц и 20 °С |
|-------|------------------------|-----------------------------|--|-------------------------|
| 1     | 2                      | 3                           | 4  | 5                       |
| 1     | Асбоцемент             | 1,6–1,8                     | 2–3  | –                       |
| 2     | Битумы                 | 1                           | 15–20                                      | 0,03–0,05               |
| 3     | Бумага                 | 0,7–0,87                    | 5–10                                       | 0,02                    |
| 4     | Винипласт              | 1,35–1,4                    | 15–30                                      | 0,01–0,05               |
| 5     | Воздух                 | 0,00121                     | 21,9–22,7( $\frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ ) | (2–4) 10 <sup>-7</sup>  |
| 6     | Гетинакс               | 1,3–1,4                     | 16–28                                      | 0,02–0,018              |
| 7     | Древесина              | 0,6–0,78                    | 2,2–5,6                                    | 0,3                     |
| 8     | Лавсан                 | 1,3–1,4                     | 80–120                                     | 0,02–0,06               |
| 9     | Лакоткань              | 0,9–1,35                    | 20–75                                      | 0,02–0,1                |
| 10    | Масло трансформаторное | 0,84–0,89                   | 15–20                                      | 0,0006–0,001            |
| 11    | Миканиты               | 2–2,2                       | 15–24                                      | 0,03–0,05               |
| 12    | Мрамор                 | 2,5–2,9                     | 1–4  | 0,005–0,01              |
| 13    | Оргстекло              | 1–1,8                       | 20–40                                      | 0,01–0,05               |
| 14    | Парафин                | 0,85–0,9                    | 22–32                                      | 0,0003–0,0007           |
| 15    | Полистирол             | 1,05–1,07                   | 25–40                                      | 0,0002–0,0008           |
| 16    | Поливинилхлорид        | 1,2–1,6                     | 6–15                                       | 0,05–0,08               |
| 17    | Капрон                 | 1,13–1,15                   | 15–18                                      | 0,012–0,027             |
| 18    | Полиэтилен             | 0,92–0,96                   | 35–60                                      | 0,0002–0,0006           |
| 19    | Резина                 | 1,7–2                       | 20–45                                      | 0,01–0,03               |
| 20    | Слюда                  | 2,68–2,89                   | 95–175                                     | 0,0004–0,015            |
| 21    | Совол                  | 1,54–1,56                   | 17–18                                      | 0,015–0,03              |
| 22    | Стекло                 | 2,5–2,7                     | 30–45                                      | 0,0002–0,01             |
| 23    | Текстолит              | 1,3–1,45                    | 3–6  | –                       |
| 24    | Фарфор                 | 2,3–2,5                     | 22–28                                      | 0,022–0,04              |
| 25    | Фибра                  | 1–1,2                       | 3,5–7                                      |                         |
| 26    | Шифер                  | 2,7–2,9                     | 0,5–1,5                                    | 0,08–0,12               |
| 27    | Эбонит                 | 1,15–1,25                   | 15–20                                      | 0,005–0,015             |
| 28    | Электрокартон          | 0,9–1,25                    | 12–32                                      | 0,003–0,01              |

Металлические проводниковые материалы могут быть разделены на материалы высокой проводимости (табл. 1.3.2) и материалы высокого сопротивления (табл. 1.3.3).

Таблица 1.3.2

Технические данные металлических проводниковых материалов

| №<br>ц/п | Материал | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Температура<br>плавления,<br>°С | $\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ | Температурный<br>коэффициент<br>сопротивления, 1/°С |
|----------|----------|---------------------------------|---------------------------------|--|---|
| 1        | 2        | 3                               | 4                               | 5  | 6   |
| 1        | Алюминий | 2,7                             | 657                             | 0,029  | 0,004   |
| 2        | Бронза   | 8,8                             | 900                             | 0,021–0,05   | 0,004   |
| 3        | Вольфрам | 18,7                            | 3400                            | 0,055  | 0,004   |
| 4        | Висмут   | 9,8                             | 271                             | 1,2  | 0,004   |
| 5        | Графит   | 1,9–2,3                         | 3850                            | 13,5   | 0,008   |
| 6        | Кадмий   | 8,6                             | 321                             | 0,76   | 0,004   |
| 7        | Латунь   | 8,4–8,7                         | 960                             | 0,03–0,07  | 0,002   |
| 8        | Медь     | 8,9                             | 1083                            | 0,018  | 0,0041  |
| 9        | Магний   | 1,74                            | 650                             | 0,04   | 0,0038  |
| 1        | 2        | 3                               | 4                               | 5  | 6   |
| 10       | Молибден | 10,2                            | 2570                            | 0,05   | 0,0049  |
| 11       | Никель   | 8,8                             | 1452                            | 0,09   | 0,0068  |
| 12       | Олово    | 7,3                             | 232                             | 0,12   | 0,0044  |
| 13       | Платина  | 21,4                            | 1770                            | 0,09   | 0,0031  |
| 14       | Ртуть    | 13,6                            | -38,7                           | 0,95   | 0,00027   |
| 15       | Свинец   | 11,3                            | 327                             | 0,217  | 0,004   |
| 16       | Серебро  | 10,5                            | 960                             | 0,016  | 0,0036  |
| 17       | Сталь    | 7,85                            | 1500                            | 0,145  | 0,006   |
| 18       | Цинк     | 7,1                             | 419                             | 0,06   | 0,0039  |
| 19       | Чугун    | 7,2                             | 1200                            | 0,5  | 0,0009  |

Таблица 1.3.3

Технические данные материалов высокого сопротивления

| №<br>п/п | Материал    | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Температура<br>плавления,<br>°С | $\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ | Температурный<br>коэффициент<br>сопротивления, 1/°С |
|----------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|--|---|
| 1        | Константан  | 8,9                             | 1270                            | 0,4–0,5  | 0,00005   |
| 2        | Манганин    | 8,4                             | 960                             | 0,42–0,5   | 0,00006   |
| 3        | Нейзиль-бер | 8,4                             | 1050                            | 0,3–0,45   | 0,00036   |
| 4        | Никелин     | 11,2                            | 1060                            | 0,4–0,44   | 0,0003  |
| 5        | Нихром      | 8,2                             | 1400                            | 1,0–1,2  | 0,00016   |
| 6        | Фехраль     | 7,3                             | 1490                            | 1,26–1,35  | 0,00006   |
| 7        | Хромель     | 7,1                             | 1500                            | 1,45   | 0,00004   |

Полупроводниковые материалы подразделяются на:

- 1) простые полупроводники;
- 2) полупроводниковые химические соединения;
- 3) полупроводниковые комплексы.

К простым электронным полупроводникам относятся: кремний, германий, селен, бор, фосфор, мышьяк, сера и другие. В технике особое значение приобрели кремний, германий, селен.

К полупроводниковым химическим соединениям относятся: SiC (кремний-углерод), InSb (индий-сурьма), GaAs (галлий-мышьяк) и другие.

К полупроводниковым комплексам относятся материалы с полупроводящей или проводящей фазой из карбида кремния, графита и т.п. Наиболее распространенный – тирит и силит.

Приборы из полупроводниковых материалов имеют следующие достоинства:

- 1) малые габариты и масса;
- 2) простота конструкции;
- 3) надежность;
- 4) большой срок службы.

### **Магнитные материалы**

В электротехнике широко применяются магнитные материалы, которые подразделяются на магнитно-мягкие и магнитно-твердые.

Магнитно-мягкие материалы используются для изготовления сердечников трансформаторов, электромагнитов, в измерительных приборах и тогда, когда при наименьшей затрате энергии нужно достигнуть наибольшей индукции. К таким материалам относятся: железо (низкоуглеродистая сталь), листовая электротехническая сталь, пермаллой (железо-никелевые сплавы). Пермаллой применяется для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, реле, магнитных экранов, магнитных усилителей и бесконтактных реле. Тонколистовая электротехническая сталь имеет следующие марки: 1211 (Э11), 1212 (Э12), 1213 (Э13), 1311 (Э21), 1411 (Э31), 1511 (Э41) и т.п.

Магнитно-твердые материалы подразделяются на: легированные стали, литые магнитно-твердые сплавы; магниты из порошков; магнитно-твердые ферриты; пластические деформируемые сплавы и магнитные ленты.

Магнитно-мягкие материалы имеют малую коэрцитивную силу и большую магнитную проницаемость.

Магнитно-твердые материалы имеют большую коэрцитивную силу и сравнительно малую проницаемость.

## 1.4. Допустимые температуры нагрева электрических аппаратов и оборудования

Таблица 1.4.1

Наибольшие допустимые температуры нагрева

| № п/п | Наименование частей устройств и аппаратов   | Нагрев, °С    |
|-------|---|---------------|
| 1     | Болтовые контактные соединения и медные зажимы РУ, перемычки контакторов, автоматов и пускателей                                  | 90            |
| 2     | Гибкие соединения медные (ленточные или плетеные)   | 85            |
| 3     | Контактные соединения медных шин, выполненные при помощи пайки или сварки   | 120           |
| 4     | Скользящие и стыковые массивные контакты из меди и её сплавов   | 110           |
| 5     | Блок-контакты контакторов и пускателей латунные или стальные с контактной частью из серебра или меди                              | 85            |
| 6     | Контактные губки и ножи рубильников   | 65            |
| 7     | Контакты предохранителей  | 120           |
| 8     | Изоляционные детали аппаратов, выполненные из:<br>слюды или асбеста со связующими материалами, шифера<br>фибры или электрокартона | 110<br><br>80 |

## 1.5. Расчет мощности электронагревательных приборов

Допустим, требуется нагреть заданное количество материала известной теплоемкости с какой-либо начальной температурой до конечной температуры в заданное время. Необходимо найти сечение и длину нагревателей при известном напряжении.

Расчет начинают с определения полезного количества тепла без учета тепловых потерь:

$$Q_{\text{пол}} = cm(t_k - t_H), \text{ кДж,}$$

где  $m$  – масса нагреваемого материала, кг;

$t_H$  – начальная температура материала, °С;

$t_k$  – конечная температура материала, °С;

$c$  – удельная теплоемкость материала, кДж/кг·град (табл. 1.5.1).

Определив  $Q_{\text{пол}}$ , можно найти общее количество тепла (с учетом излучения тепла в окружающую среду):

$$Q_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{\eta},$$

где  $\eta$  – КПД нагревательного прибора (табл. 1.5.2).

Таблица 1.5.1

## Удельная теплоемкость некоторых материалов

| № п/п | Материал               | Удельная теплоемкость С, кДж/кг·град |
|-------|------------------------|--------------------------------------|
| 1     | Алюминий               | 0,91                                 |
| 2     | Латунь                 | 0,38                                 |
| 3     | Медь                   | 0,39                                 |
| 4     | Нейзильбер             | 0,4                                  |
| 5     | Никель                 | 0,45                                 |
| 6     | Олово                  | 0,23                                 |
| 7     | Свинец                 | 0,13                                 |
| 8     | Сталь                  | 0,5                                  |
| 9     | Цинк                   | 0,4                                  |
| 10    | Вода                   | 4,2                                  |
| 11    | Дерево                 | 0,24–0,27                            |
| 12    | Кирпич строительный    | 0,92                                 |
| 13    | Песок сухой            | 0,71–0,92                            |
| 14    | Ткань хлопчатобумажная | 0,25                                 |

Таблица 1.5.2

## КПД нагревательных приборов

| № п/п | Электронагревательные приборы           | КПД       |
|-------|---|-----------|
| 1     | Электроды для отопления                 | 0,98      |
| 2     | Погружные электронагреватели            | 0,85–0,95 |
| 3     | Печи сопротивления для термообработки   | 0,6–0,85  |
| 4     | Кастрюли, чайники                       | 0,65–0,8  |
| 5     | Электроды закрытые                      | 0,6–0,8   |
| 6     | Электронагрев форм                      | 0,5–0,7   |
| 7     | Электроды открытые                      | 0,56      |
| 8     | Печь сопротивления для сушки материалов | 0,2–0,3   |

Мощность нагревательного прибора определяют по формуле:

$$P = \frac{0,00028kQ_{\text{общ}}}{t}, \text{ кВт},$$

где  $k$  – коэффициент запаса,  $k = 1,1–1,3$ ;

$t$  – время нагрева изделий, час.

На практике используют ряд приближенных, и эмпирических формул для определения  $P$  нагревателя.

Мощность  $P$ , требуемая для нагрева воды:

$$P = 0,07 \frac{G\tau}{\eta t}, \text{ кВт},$$

где  $G$  – вес воды в кг;

$\tau$  – повышение температуры в °С, которое должна получить вода;

$t$  – продолжительность нагрева в минутах;

$\eta$  – КПД нагревателя.

Мощность нагревательного прибора, требуемая для нагрева помещения до температуры  $\tau$  при наружной температуре  $\tau_0$ :

$$P = \frac{F \cdot k (\tau - \tau_0)}{860}, \text{ кВт},$$

где  $F$  – внутренняя поверхность помещения (стен, потолка и т.д.) в  $\text{м}^2$ ;

$k$  – коэффициент теплопередачи,  $\frac{\text{Кал}}{\text{м}^2}$ ;  $k = 1,7$  – для наружной стены в 1 кирпич;  $1,5$  – для внутренней стены в 2 кирпича,  $3$  – для двойного окна;  $5$  – для одинарного окна;  $1,1$  – для наружной стены 1 м и с одинарным окном.

Мощность электронагревательных приборов может быть определена при помощи коэффициентов удельной мощности на единицу рабочей поверхности прибора (табл. 1.5.3).

Таблица 1.5.3

Коэффициенты удельной мощности электронагревательных приборов

| №<br>п/п | Электронагревательные приборы                    | $P_{\text{уд.}}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ |
|----------|--|---|
| 1        | Электроплитки закрытого типа                     | 2÷3   |
| 2        | Электромуфельные лабораторные печи               | 3÷4   |
| 3        | Электрокастрюли, чайники                         | 3,5÷4,5   |
| 4        | Электроплитки «интенсивного» накала              | 5÷6   |
| 5        | Трубчатые электронагреватели, погруженные в воду | 7÷8   |

Для низкотемпературных печей (температура менее 200–300 °С) допустимую поверхностную мощность принимают равной 4÷6 Вт/см<sup>2</sup>, для высокотемпературных печей ( $t = 700$  °С) допустимая удельная поверхностная мощность определится согласно [10].

После выбора материалов и допустимой удельной поверхностной мощности расчет нагревательных элементов сводится к определению их размеров.

Диаметр нагревателя из круглого сечения:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 P \cdot P^2}{\pi^2 U^2 U \omega_{\text{доп}}}}, \text{ мм},$$

где  $P$  – мощность нагревателей, кВт;

$U$  – напряжение нагревателей, В;

$\pi = 3,14$ .

Длина круглого нагревателя:

$$l = \sqrt{\frac{10 P U^2}{4 \pi r \cdot \omega_{\text{доп}}^2}}.$$

Стандартные сечения круглых нагревателей в мм: 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,2; 3,6; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,3; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0; 11,0; 12,0; 13,0; 14,0; 15,0; 16,0; 17,0; 18,0; 19,0; 20,0.

Диаметр спирали нагревателя принимают:

– для хромоалюминиевых сплавов  $D = (4 \div 6) d$ ;

– для нихромов и их сплавов  $D = (7 \div 10) d$ .

Для устранения местных нагревов спираль необходимо растянуть, чтобы расстояние между витками было в  $1,5 \div 2,0$  раза больше диаметра проволоки.

**Пример 1.5.1.** Определить  $P$  сушильного шкафа,  $d$  и  $\ell$  нагревательного элемента для нагрева кирпича до  $250^\circ\text{C}$ , если масса нагрева  $100$  кг. Время нагрева  $2$  ч. Нагреватели подвешены в спокойном воздухе.

**Решение**

1. Количество тепла, требуемое для нагрева кирпича:

$$Q_{\text{потр}} = Cm (t_k - t_H) = 0,92 \cdot 100 (250 - 20) = 21050 \text{ кДж.}$$

2. Общее количество тепла с учетом потерь:

$$Q_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{потр}}}{\eta} = \frac{21050}{0,7} = 30300 \text{ кДж.}$$

3. Мощность нагревателей:

$$P = \frac{0,00022 \text{к} Q_{\text{общ}}}{t} = \frac{0,00023 \cdot 1,1 \cdot 30300}{2} = 4,6 \text{ кВт.}$$

4. Принимаем  $U = 220$  В, нагреватель Х20Н80, допустимая удельная поверхностная мощность:

$$\omega_{\text{доп}} = 6 \text{ Вт/см}^2,$$

тогда диаметр нагревателя будет:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 P \cdot P^2}{\pi^2 U^2 \omega_{\text{доп}}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot 1,2 \cdot 4,6^2}{3,14^2 \cdot 220^2 \cdot 6}} = 2,46 \text{ мм.}$$

Принимаем  $d = 2,5$  мм.

5. Длина нагревателей:

$$\ell = \sqrt{\frac{10 P U^2}{4 \pi r \cdot \omega_{\text{доп}}^2}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 4,6 \cdot 220^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 6^2}} = 45 \text{ мм.}$$

## 1.6. Делители напряжения

Общее напряжение  $U$  на последовательно включенных  $C_1$  и  $C_2$  распределится обратно пропорционально величинам емкостей, а на  $Z_1$  и  $Z_2$  – прямо пропорционально величинам сопротивлений (рис. 1.6.1):

$$U_1 + U_2 = U,$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1}{Z_2},$$

$$U_1 + U_2 = U,$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}.$$

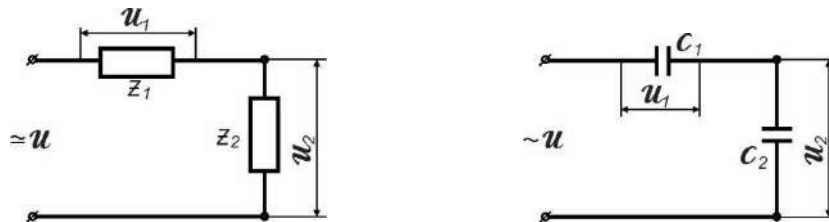


Рис. 1.6.1. Последовательное включение резисторов, конденсаторов

Для последовательного соединения не следует брать конденсаторы на предельно допустимые напряжения.

В цепях постоянного тока емкостный делитель напряжения применять нельзя.

Не рекомендуется включать последовательно конденсаторы с резко различными сопротивлениями изоляции.

### 1.7. Распределение тока при параллельном включении резисторов, конденсаторов

Общий ток  $I$  на параллельно включенных  $Z_1$  и  $Z_2$  распределится обратно пропорционально величинам сопротивлений, а на  $C_1$  и  $C_2$  – прямо пропорционально величинам емкостей (рис. 1.7.1):

$$I_1 + I_2 = I,$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1},$$

$$I_1 + I_2 = I,$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{C_1}{C_2}.$$

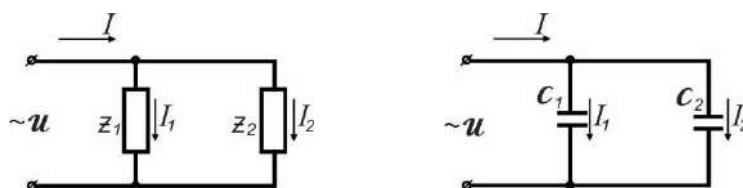


Рис. 1.7.1. Параллельное включение резисторов, конденсаторов

## 1.8. Расчет шунтов и добавочных резисторов

**Пример 1.8.1.** Необходимо из магнитоэлектрического вольтметра на 1,5 В с добавочным сопротивлением  $r_{доб} = 145$  Ом и сопротивлением рамки 5 Ом сделать амперметр на 1 А. Определить сопротивление шунта (рис. 1.8.1).

### Решение

1. Номинальный ток, на который рассчитан прибор:

$$I_{НОМ} = \frac{U}{r_{доб} + r_u} = \frac{1,5}{145 + 5} = 0,01 \text{ А.}$$

2. Шунтирующий множитель:

$$K = \frac{I}{I_{НОМ}} = \frac{1}{0,01} = 100.$$

3. Сопротивление шунта:

$$r_{ш} = \frac{r_u + r_{доб}}{\frac{I}{I_{НОМ}} - 1} = \frac{150}{99} = 1,52 \text{ Ом.}$$

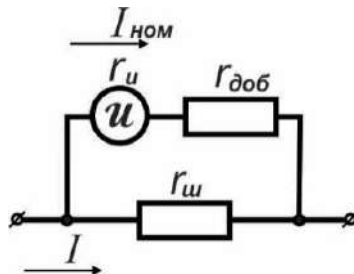


Рис. 1.8.1. К расчету шунта

$$r_{ш} = \frac{r}{K - 1},$$

$$r = r_u + r_{доб},$$

$$K = \frac{I}{I_{НОМ}},$$

$$r_{ш} = \frac{r_u + r_{доб}}{\frac{I}{I_{НОМ}} - 1}.$$

**Пример 1.8.2.** Сопротивление вольтметра на 3 В равно 500 Ом. Определить величину  $r_{доб}$ , которое необходимо для измерения этим прибором напряжения  $U = 150$  В (рис. 1.8.2).

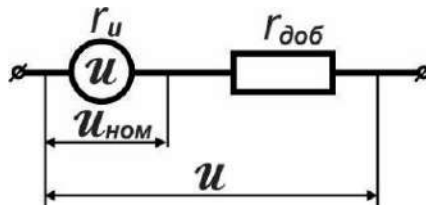


Рис. 1.8.2. К расчету добавочного резистора

$$r_{доб} = r - r_u,$$

$$r_{доб} = r_u(k - 1),$$

$$k = \frac{U}{U_{НОМ}};$$

$$r_{доб} = r_u\left(\frac{U}{U_{НОМ}} - 1\right).$$

### Решение

$$r_{доб} = r_u\left(\frac{U}{U_{НОМ}} - 1\right) = 500\left(\frac{150}{3} - 1\right) = 24,5 \text{ кОм}.$$

## 1.9. Определение по счетчику нагрузки потребителя

Очень часто необходимо определить нагрузку двигателя, линии или фидера подстанции, пользуясь счетчиком электрической энергии. Счетчики могут быть различных конструкций и с различными обозначениями их постоянных. Для устранения ошибок при расчетах приведена табл. 1.9.1, позволяющая при всяком типе счетчика определить нагрузку электрической установки в кВт (кВАр).

Таблица 1.9.1

Определение нагрузки электрической установки в кВт (кВАр)

| Род тока | П/п | Данные счетчика   | Р, кВт (Q, кВАр)            |
|----------|-----|---|-----------------------------|
| ≅        | 1   | 1 кВт·ч,<br>1 кВАр·ч<br>С оборотов (импульсов)                        | $\frac{3600 n}{CT}$         |
|          | 2   | 1 гВт·ч,<br>1 гВАр·ч –<br>С оборотов                                  | $\frac{360 n}{CT}$          |
|          | 3   | 100 Вт, 100 ВАр<br>К об/мин   | $\frac{6 n}{KT}$            |
| ~        | 4   | Полная нагрузка счетчика к об/мин<br>$I_{НОМ} - A, \quad U_{НОМ} - B$ | $\frac{\sqrt{3}nIU}{1000k}$ |
| =        | 5   | 1 об, якоря (диска) –<br>L(а·сек) $U_{НОМ} - B$                       | $\frac{nLU}{1000T}$         |
|          | 6   | Полная нагрузка счетчика К об/мин<br>$I_{НОМ} - A, \quad U_{НОМ} - B$ | $\frac{nIU}{1000K}$         |

В (1), (2), (3) и (5) случаях (табл. 1.9.1) поступают так: в момент прохождения черты на диске счетчика пускается секундомер. Когда диск совершил некоторое целое число оборотов  $n$ , секундомер останавливается и определяется время  $T$  секунд, соответствующее  $n$  оборотам диска.

В (4) и (6) случаях определяется аналогично то число оборотов  $n$ , которое диск успеет сделать в течение одной минуты.

Если счетчик включен через трансформатор напряжения с  $K_u = U_1/U$  и через трансформаторы тока  $K_I = I_1/I$ , то все приведенные выражения должны быть умножены на  $(K_u \cdot K_I)$ . При 1-фазной переменной и 3-фазной симметричной нагрузке по счетчику активной энергии и показаниям амперметра и вольтметра можно определить  $\cos \varphi$  потребителя:

$$\cos \varphi_{1\phi} = \frac{P_1}{U_1 I_1}, \quad \cos \varphi_{3\phi} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\Delta} I_{\phi}},$$

где  $P$  – кВт,  $U_1, U_{\Delta}$  – кВ,  $I_1, I_{\phi}$  – А.

У всех типов счетчиков при пониженных температурах появляется отрицательная погрешность, достигаемая при температуре  $10^{\circ}\text{C}$  около 3 %, а при тройной перегрузке – порядка 25 %.

**Пример 1.9.1.** Диск 3-фазного счетчика совершил 4 оборота за 28 секунд, 1 кВт·час соответствует 450 оборотам диска. Определить нагрузку и  $\cos \varphi$  потребителя, если  $K_I = 100/5$ ,  $U_{\Delta} = 380$  В,  $I_{\phi} = 41$  А, нагрузка симметричная.

**Решение**

$$P = \frac{3600n}{cT} \cdot K_I = \frac{3600 \cdot 4}{450 \cdot 28} \cdot 20 = 22,9 \text{ кВт},$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\Delta} I_{\phi}} = \frac{22,9}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 41} \approx 0,85.$$

### 1.10. Действующее, амплитудное и среднее значения переменного тока

Переменный синусоидальный ток в течение периода имеет различные мгновенные значения. Действующее значение переменного тока равно такому постоянному току, который, проходя через то же сопротивление, за то же время, и выделяет такое же количество тепла, что и переменный ток.

Электроизмерительные приборы (амперметры, вольтметры), включенные в цепь переменного тока, показывают действующие значения тока или напряжения.

Зависимость между действующим и амплитудным значениями для  $I$ ,  $U$ ,  $E$  имеет вид (рис. 1.10.1).

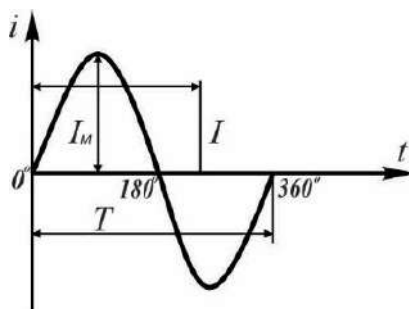


Рис. 1.10.1. К определению действующего значения

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Среднее значение переменной синусоидальной величины за период равно нулю, поэтому среднее значение имеем в виду за полпериода (рис. 1.10.2):

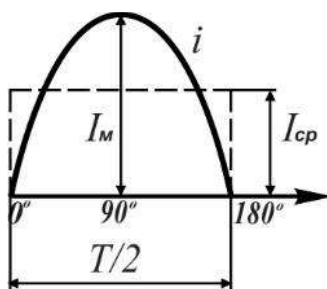


Рис. 1.10.2. К определению среднего значения

Зависимость между средним и амплитудным значениями для I, U, E:

$$I_{cp} = 0,637I_m,$$

$$U_{cp} = 0,637U_m,$$

$$E_{cp} = 0,637E_m.$$

Отношение действующего значения переменной величины к ее среднему значению называется коэффициентом формы кривой и для синусоидальных величин:

$$K_\phi = \frac{I}{I_{cp}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Отношение амплитудного значения переменной величины к ее действующему значению называется коэффициентом амплитуды и для синусоидальных величин:

$$K_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2} = 1,41.$$

**Пример 1.10.1.** Вольтметр, включенный в сеть переменного тока, показал  $U = 220$  В. Определить значения  $U_m$  и  $U_{cp}$ .

**Решение**

$$1. U_m = U\sqrt{2} = 310\text{В.}$$

$$2. U_{cp} = 0,637U_m = 0,637 \cdot 310 = 197,5\text{В.}$$

### 1.11. Резонанс напряжений и резонанс токов

Если последовательная цепь содержит индуктивность, емкость и активное сопротивление и  $X_L = X_C$ , то  $I = \frac{U}{r}$ ,  $\cos \varphi = 1$  (рис. 1.11.1 а, б).

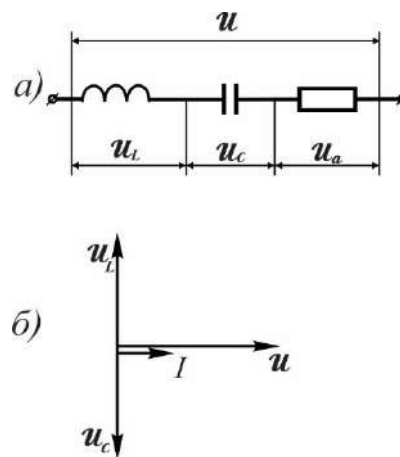


Рис. 1.11.1. Резонанс напряжений  
(а – электрическая схема, б – векторная диаграмма)

Этот случай называется резонансом напряжений.

Условия резонанса напряжений следующие:

1. При постоянной индуктивности ( $L = \text{const}$ ) меняется емкость и становится равной:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}.$$

2. При постоянной емкости ( $C = \text{const}$ ) меняется индуктивность и становится равной:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}.$$

3. Изменение обеих величин приводит к равенству:

$$\text{или } \omega L = \frac{1}{\omega C} \text{ или } X_L = X_C.$$

4. Угловая частота сети, изменяясь, становится равной:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \text{ или } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

где  $f_0$  – резонансная частота.

Если параллельная цепь содержит индуктивность, емкость, активное сопротивление и  $I_1 = I_2$  то  $I_3 = \frac{U}{r}$ ,  $\cos \varphi = 1$ . Такой случай называется резонансом токов (рис. 1.11.2 а, б).

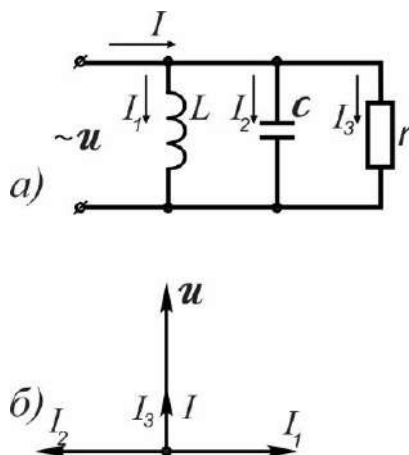


Рис. 1.11.2. Резонанс токов  
(а – электрическая схема, б – векторная диаграмма)

Ток  $I$  в общей неразветвленной части цепи при резонансе токов может быть значительно меньше, чем токи в ветвях с индуктивностью и емкостью.

**Пример 1.11.1** (рис. 1.11.1),  $u = 120$  В,  $X_L = X_C = 100$  Ом,  $r = 6$  Ом. Определить ток при резонансе напряжений и напряжения на отдельных участках цепи.

**Решение**

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{6} = 20 \text{ А},$$

$$U_a = Ir = 20 \cdot 6 = 120 \text{ В},$$

$$U_L = IX_L = 20 \cdot 10 = 200 \text{ В},$$

$$U_C = IX_C = 20 \cdot 10 = 200 \text{ В}.$$

## 1.12. Ряды напряжений, токов, частот

Основной ряд постоянного и переменного напряжения для изделий, предназначенных для использования электроэнергии: 0,6; 1,2; 2,4; 6; 9; 12; 27; 40; 60; 110; 220; 380; 660; 1140; 3000; 6000; 10000; 20000; 35000; 110000; 220000; 330000; 500000; 750000; 1150000 В.

Для источников и преобразователей электроэнергии существует ГОСТ 23366.

Переменные напряжения, (В): 6; 12; 28,5; 42; 62; 115;. 120; 208; 230; 400; 690; 1200; 3150; 6300; 10500; 13800; 15750; 18000; 20000; 24000; 27000; 38500; 121000; 242000; 347000; 525000; 787000.

Постоянные напряжения, (В): 6; 9;. 12; 28,5; 48; 62; 115; 230; 460; 690; 1200; 3300; 6600.

Стандарт (ГОСТ 6827) устанавливает номинальные значения постоянного и переменного токов от 0,0001 до 250000 А с частотой до 10000 Гц в нормальных и установившихся режимах работы электрических приборов, оборудования и приемников электрической энергии.

Из перечисленных значений токов от 1000 А предпочтительными являются следующие: 1,00; 1,60; 2,50; 4,00; 6,30 А, а также десятичные кратные и дольные значения этих токов. Номинальные токи со значениями 0,125; 0,315; 0,63; 3,15; 6,30; 12,5; 31,5 А можно округлять до следующих значений: 0,12; 0,30; или 0,32; 3,0 или 3,2; 6,00; 12,0; 32,0. Значения токов менее 0,1 А округляют аналогично.

Номинальные значения частот, установленные ГОСТ 6697:

– для источников энергии: 50, 400, 1000, 6000, 10000 Гц;

– для преобразователей и приемников электрической энергии: 50, 400, 1000, 2000, 4000, 6000, 10000 Гц.

Дополнительно, согласно стандарту, допускается применение следующих частот:

– для электроинструмента, электроприводов центрифуг, сепараторов и деревообрабатывающих станков: 100; 150; 200; 300 Гц;

– для электротермического оборудования: 500; 2400; 8000 Гц;

– для корабельных навигационных гироскопических устройств: 500 Гц.

Все указанные номинальные частоты кратны основной частоте тока (50 Гц).

## Глава 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

### 2.1. Общие сведения

#### 2.1.1. Назначение

Для удешевления стоимости электропередачи и уменьшения потерь энергии в ней необходимо повышать напряжение до сотен киловольт. При распределении электроэнергии между потребителями необходимо понижать напряжение до сотен и десятков вольт. Выработка электроэнергии осуществляется генераторами напряжением 10,5 кВ или 15,75 кВ. Все это вызывает необходимость многократного повышения и понижения напряжения, которое осуществляется трансформаторами.

Первый трансформатор построил П.Н. Яблочков в 1873 г. для питания изобретенных им электрических свечей.

В 1882 г. И.Ф. Усагин использовал трансформатор для питания электроэнергией двигателей и ламп.

В 1891 г. М.О. Доливо-Добровольский построил первый трехфазный трансформатор.

В настоящее время трансформаторы получили широкое распространение во всех областях техники.

#### 2.1.2. Определение, принцип действия и устройство

**Трансформатор** (от лат. *transformo* – преобразовывать) – это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки на каком-либо магнитопроводе и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем (напряжений) переменного тока в одну или несколько других систем (напряжений) без изменения частоты.

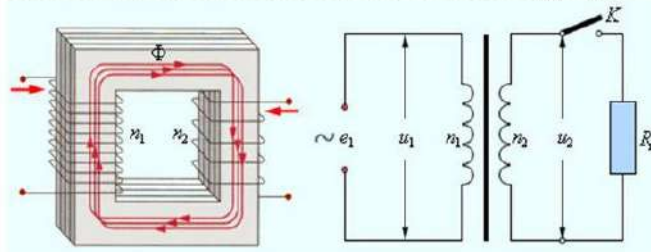
Работа трансформатора основана на двух базовых принципах:

1. Изменяющийся во времени электрический ток создаёт изменяющееся во времени магнитное поле (электромагнетизм).
2. Изменение магнитного потока, проходящего через обмотку, создаёт ЭДС в этой обмотке (электромагнитная индукция).

Устройство и принцип действия трансформатора показаны на рис. 2.1.1. На одну из обмоток, называемую *первичной обмоткой*, подаётся напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке переменный ток намагничивания создаёт переменный магнитный поток в магнитопроводе. В результате электромагнитной индукции переменный магнитный поток в магнитопроводе создаёт во всех обмотках, в том числе и в первичной, ЭДС индукции, пропорциональную первой производной магнитного потока, при синусоидальном токе сдвинутой на  $90^\circ$  в обратную сторону по отношению к магнитному потоку.

## Принцип действия трансформатора

...основан на явлении электромагнитной индукции



$e = - \dot{\Phi}$  мгновенное значение ЭДС по закону Фарадея

$\Phi = \Phi_m \cos \omega t$        $e = \varepsilon_m \sin \omega t$

$\varepsilon_m = \omega \Phi_m$  - амплитуда колебаний в одном витке

$e_1/e_2 = n_1/n_2$        $|e_1| \approx |u_1|$      $|e_2| \approx |u_2|$

$n$ -число витков

Рис. 2.1.1. Устройство и принцип работы однофазного трансформатора

Различают двухобмоточные трансформаторы, имеющие две гальванически не связанные обмотки, и многообмоточные трансформаторы, имеющие три и более гальванически не связанные обмотки.

Однофазный трансформатор (рис. 2.1.2) имеет две магнитносвязанные обмотки 1 и 2 с разным числом витков, помещенные для усиления магнитной связи на стальном замкнутом магнитопроводе – сердечнике (3).

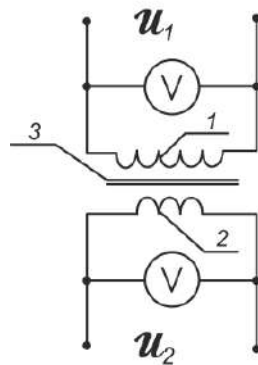


Рис. 2.1.2. Электрическая схема однофазного трансформатора

Сердечник для уменьшения потерь от вихревых токов набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм, а при повышенной частоте – из более тонких листов (0,1–0,2 мм). Части сердечника, на которых располагаются обмотки, называются стержнями, а части, замыкающие их, – ярмом. Внутреннее пространство между стержнями и ярмом называется окном.

Обмотка, к которой подводится энергия, называется первичной, обмотка, к которой подключается потребитель, – вторичной.

Если напряжение вторичной обмотки меньше, чем первичной, то трансформатор называется понижающим, если наоборот – повышающим.

Трехфазные трансформаторы конструктивно подразделяются на трансформаторы стержневого (рис. 2.1.3) и броневые типы (рис. 2.1.4). Электрическая схема трехфазного трансформатора представлена на рис. 2.1.5.

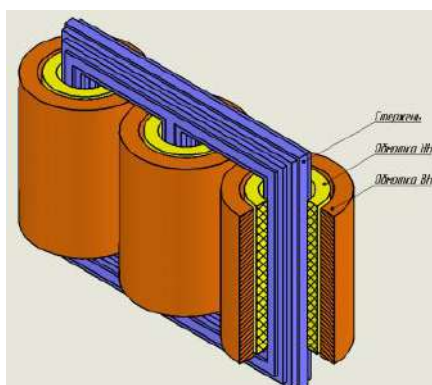


Рис. 2.1.3. Трехфазный трансформатор стержневого типа

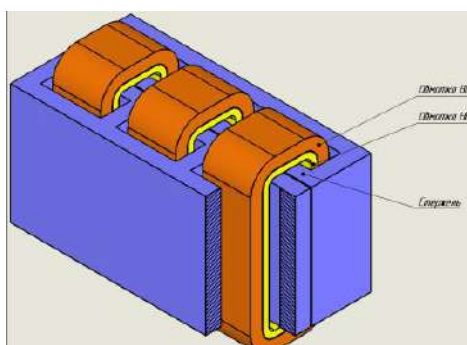


Рис. 2.1.4. Трехфазный трансформатор броневые типа

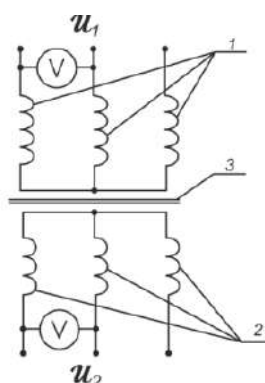


Рис. 2.1.5. Электрическая схема трехфазного трансформатора

Силовым называется трансформатор, который предназначен для преобразования электрической энергии в электросетях и в установках для приема и использования электроэнергии. К силовым трансформаторам относятся:

- однофазные трансформаторы мощностью 5 кВА и более;
- трехфазные и многофазные трансформаторы мощностью 6,3 кВА и более.

При мощностях от 6,3 кВА до 0,63 кВА силовые трансформаторы относятся к средней и малой мощности.

Силовые трансформаторы производятся для длительной службы в течение десятков лет (более 25 лет).

Особую группу составляют микротрансформаторы мощностью менее 0,63 кВА, которые существенно отличаются от силовых трансформаторов по исполнению.

### **2.1.3. Номинальные мощности силовых трансформаторов**

Важнейшим параметром трансформатора является его номинальная мощность. Под номинальной мощностью трансформатора понимается полная мощность трансформатора, отдаваемая его вторичной обмоткой при номинальном токе и номинальном напряжении (ВА, кВА)

Ниже приводится ряд номинальных мощностей (кВА) трехфазных трансформаторов из ГОСТ 9680:

0,01; (0,012); 0,016; (0,020); 0,025; (0,032); 0,040; (0,050); 0,063; (0,080); 0,100; (0,125); 0,160; (0,200); 0,250; (0,315); 0,400; (0,500); 0,630; (0,800); 1,00; (1,25); 1,60; (2,00); 2,50; (3,15); 4,00; (5,00); 6,30; (8,00); 10,0; (12,5); 16,0; (20,0); 25,0; (31,5); 40,0; (50,0); 63,0; (80,0); 100; (125); 160; (200); 250; 320; (315); 400; (500); 630; (800); 1000; (1250); 1600; (2000); 2500; 3200; (3150); 4000; (5000); 6300; (8000); 10000; (12500); 16000; (20000); 25000; 32000; (31500); 40000; (50000); 63000; 80000; 100000; 125000; 160000; 200000; 250000; (315000); 400000; 500000; 630000; 800000; 1000000; 1250000; 1600000; 2000000; 2500000; 3150000; 4000000; 5000000; 6300000; 8000000.

*Примечания:*

1. Номинальные мощности, указанные в скобках, применяются только для специальных трехфазных трансформаторов и трансформаторов, предназначенных для экспорта.

2. Этот стандарт не распространяется на трансформаторы для питания радиотехнических и электронных устройств, для бытовых электроприборов.

3. Номинальные мощности однофазных трансформаторов, предназначенных для работы в трехфазной группе, составляют 1/3 указанных мощностей.

ностей. Для однофазных трансформаторов, не предназначенных для такого применения, значения номинальной мощности принимаются таким же, как и для трехфазных трансформаторов.

## 2.2. Условные обозначения трансформаторов и автотрансформаторов

Первая буква указывает число фаз трансформаторов:

О – однофазный, Т – трехфазный;

вторая (одна или две) – вид охлаждения (табл. 2.2.1);

третья – число обмоток, работающих на самостоятельные сети, если оно больше двух;

Т – трехобмоточный трансформатор;

Н – трансформаторы и автотрансформаторы, имеющие встроенное регулирование напряжения под нагрузкой (РПН);

А – добавляется для обозначения автотрансформатора;

Р – вторая буква (перед системой охлаждения) – расщепленные обмотки на стороне НН;

С – последняя буква в обозначении типа трансформатора для СН с повышенным значением  $U_k$ .

Таблица 2.2.1

Виды охлаждения трансформаторов

| Вид охлаждения  | Условное обозначение |
|---|----------------------|
| Сухие трансформаторы  |                      |
| Естественное воздушное: при открытом исполнении                   | С                    |
| Естественное воздушное при защищенном исполнении                  | СЗ                   |
| Естественное воздушное при герметичном исполнении                 | СГ                   |
| Воздушное с дутьем  | СД                   |
| Масляные трансформаторы   |                      |
| Естественная циркуляция масла и воздуха                           | М                    |
| Принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла | Д                    |
| Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла | МЦ                   |
| Принудительная циркуляция воздуха и масла                         | ДС                   |
| Принудительная циркуляция воды и естественная циркуляция масла    | МВ                   |
| Принудительная циркуляция воды и масла                            | Ц                    |
| Трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком                    |                      |
| Естественное охлаждение негорючим жидким диэлектриком             | Н                    |
| Охлаждение негорючим жидким диэлектриком с дутьем                 | НД                   |

### 2.3. Габариты трансформаторов

Габаритные размеры трансформаторов представлены в табл. 2.3.1.

Таблица 2.3.1

Габариты трансформаторов в зависимости от мощности

| Габариты | Группы | Диапазон $S_n$ , кВА    | $U_n$ , кВ                      |
|----------|--------|-------------------------|---------------------------------|
| I        | 1      | До 20                   | До 35 включительно              |
|          | 2      | 25–100                  |                                 |
| II       | 3      | 160–250                 |                                 |
|          | 4      | 400–630                 |                                 |
|          | 5      | 1000                    |                                 |
| III      | 6      | 1600–2500               |                                 |
|          | 7      | 4000–6300               |                                 |
| IV       | 8      | 10000–32000             | 110                             |
|          | 9      | Выше 32000              |                                 |
| V        | 10     | До 16000                | 110 и 150                       |
|          | 11     | 25000–32000             |                                 |
| VI       | 12     | 40000–63000             | 110 и 150<br>220 и 330          |
|          | 13     | До 80000                |                                 |
| VII      | 14     | 80000–200000            | До 330 включительно<br>Выше 330 |
|          | 15     | 80000–200000            |                                 |
| VIII     | 16     | Выше 200000             | Независимо от напряже-<br>ния   |
|          | 17     | Независимо от мощности  |                                 |
|          | 18     | Для ВЛ постоянного тока |                                 |

### 2.4. Внешняя характеристика трансформатора

Увеличение нагрузки трансформатора сопровождается увеличением токов  $I_1$  и  $I_2$ , что приводит к увеличению падения напряжения в обмотках трансформатора, поэтому с увеличением нагрузки вторичное напряжение  $U_2$  изменяется.

Изменением напряжения двухобмоточного трансформатора называется арифметическая разность между номинальным вторичным напряжением при холостом ходе и напряжением на вторичной обмотке при номинальном вторичном токе  $I_{2н}$ , номинальной частоте  $f_n$ , заданном коэффициенте мощности  $\cos(\varphi)$  и номинальном напряжении на первичной обмотке  $U_{1н}$ .

Изменение напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} \cdot 100 \%$$

В зависимости от характера нагрузки трансформатора  $\Delta U$  может быть различным.

Зависимость  $U_2 = f(I_2)$  называется внешней характеристикой (рис. 2.4.1).

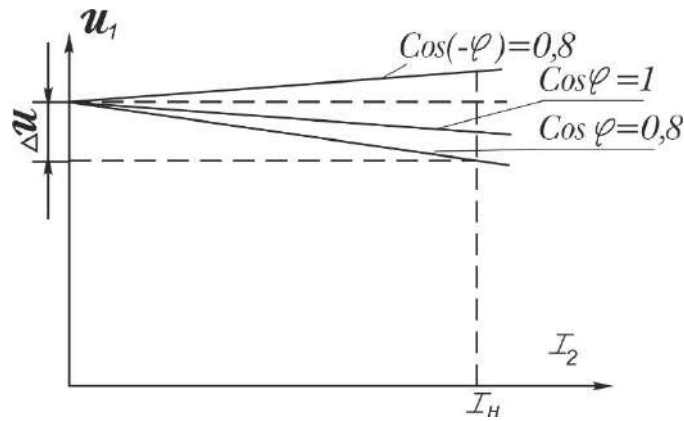


Рис. 2.4.1. Внешняя характеристика трансформатора

Уменьшение напряжения  $U_2$  зависит не только от  $I_2$ , но и от коэффициента мощности  $\cos \varphi$ . Чем ниже  $\cos \varphi$  приемника, тем значительно уменьшается  $U_2$  при увеличении тока нагрузки  $I_2$ . В современных трансформаторах  $U_2$  при номинальной нагрузке меньше напряжения холостого хода на 2–3 %.

## 2.5. Опыт холостого хода и короткого замыкания

При испытаниях трансформатора проводят опыт холостого хода и короткого замыкания.

Режим холостого хода – это режим, при котором первичная обмотка подключена к источнику питания, а вторичная обмотка разомкнута (рис. 2.5.1).

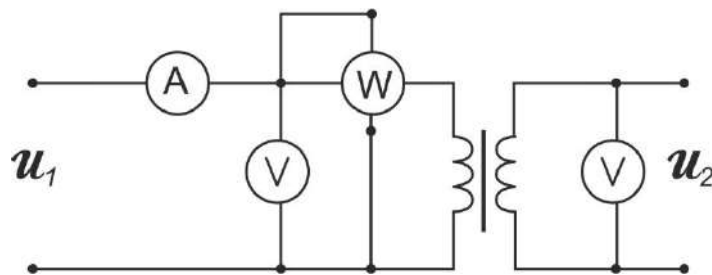


Рис. 2.5.1. Электрическая схема для исследования режима холостого хода

Вольтметры показывают напряжение первичной и вторичной обмоток, амперметр – ток холостого хода  $I_0$ , ваттметр мощность потерь холостого хода  $P_0$ . Ввиду того, что  $I_0$  мал, считается, что мощность холостого хода  $P_0$  в основном расходуется на покрытие потерь в стали.

По данным опыта холостого хода определяют:

1. Коэффициент трансформации:

$$K_T = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2},$$

где  $w_1, w_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток.

2. Ток холостого хода (%):

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} \cdot 100 \%$$

3. Сопротивления цепи намагничивания:

– активное:

$$r_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2};$$

– полное:

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0};$$

– индуктивное:

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}.$$

4. Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_1 \cdot I_0}.$$

Режим короткого замыкания – это режим, при котором концы вторичной обмотки замкнуты, а к первичной обмотке подводится такое пониженное напряжение, при котором по обмоткам проходят номинальные токи ( $I_1 = I_{1H}, I_2 = I_{2H}$ ) (рис. 2.5.2).

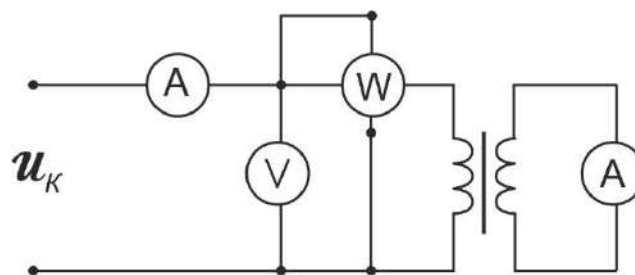


Рис. 2.5.2. Электрическая схема для исследования режима короткого замыкания

При проведении опыта измеряют напряжение  $U_k$ , ток  $I_k = I_{1H}$  и мощность первичной обмотки  $P_k$ .

По этим данным определяют

1. Напряжение короткого замыкания (в %):

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1H}} \cdot 100 \% = \frac{I_{1H} \cdot Z_k}{U_{1H}} \cdot 100 \%$$

2. Сопротивление короткого замыкания:

– активное:

$$r_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_K^2};$$

– полное:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K};$$

– индуктивное:

$$x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}.$$

3. Коэффициент мощности короткого замыкания:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{3 \cdot U_K \cdot I_K}.$$

4. Активная составляющая напряжения:

$$u_a = \frac{P_K}{S_H} \cdot 100 \% = u_K \cdot \cos \varphi_K.$$

5. Реактивная составляющая напряжения:

$$u_p = \frac{I_{1H} \cdot x_K}{U_{1H}} \cdot 100 \% = u_K \cdot \sin \varphi_K.$$

Средние значения тока  $i_0$  (%) и напряжения  $u_K$  (%) силовых трансформаторов приведены в табл. 2.5.1.

Таблица 2.5.1

Ток холостого хода и напряжение короткого замыкания трансформаторов

| Мощность трансформатора $S_n$ , кВА | Ток холостого хода $i_0$ (%) | Напряжение короткого замыкания $u_K$ (%) |
|-------------------------------------|------------------------------|--|
| 5–25                                | 10–4                         | 4,5–5,0                                  |
| 25–1000                             | 4–1,5                        | 5,0–6,5                                  |
| 1000–10000                          | 1,5–1,0                      | 6,5–8,0                                  |
| 10000–80000                         | 1,0–0,6                      | 8,0–10,0                                 |
| 80000–1000000                       | 0,55–0,3                     | 10–14                                    |

## 2.6. Потери и КПД трансформатора

### 2.6.1. Коэффициент полезного действия

Коэффициентом полезного действия (КПД) трансформатора называется отношение активной мощности вторичной обмотки  $P_2$  к активной мощности первичной обмотки  $P_1$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_K}.$$

Потери в трансформаторе слагаются из потерь в обмотках и потерь в стали сердечника.

Потери в стали (магнитные потери  $P_0$ ) зависят от частоты сети и величины магнитной индукции и определяются по показаниям ваттметра из опыта холостого хода трансформатора. Потери в обмотках трансформатора  $P_k$  (электрические потери) пропорциональны квадрату тока и определяются по показаниям ваттметра из опыта короткого замыкания.

Данные потери ( $P_0$  и  $P_k$ ) указываются в каталогах и технических данных на трансформаторы.

Реактивные потери при холостом ходе:

$$Q_0 = 0,01 \cdot i_0 \cdot S_H,$$

где  $i_0$  – в процентах от  $I_{1H}$ ,

$S_H$  – номинальная мощность в кВА.

Потребление реактивной мощности трансформатором при произвольной нагрузке:

$$Q = 0,01 \cdot (i_0 + \beta \cdot U_p) S_H,$$

где  $\beta$  – коэффициент загрузки:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}.$$

$U_p$  – реактивное напряжение короткого замыкания (%).

В табл. 2.6.1 приведены средние значения  $\Delta P$ ,  $Q_0$ ,  $Q$  силовых трансформаторов с первичным напряжением 6–15 кВ.

Таблица 2.6.1

Средние значения потерь мощности силовых трансформаторов

| Мощность, кВА | $U_1 = 6-15$ кВ              |              |            |
|---------------|------------------------------|--------------|------------|
|               | $\Delta P = P_0 + P_k$ , кВт | $Q_0$ , кВАр | $Q$ , кВАр |
| 5             | 0,23                         | 0,8          | 1,1        |
| 20            | 0,77                         | 2,4          | 3,4        |
| 100           | 2,7                          | 7            | 11         |
| 150           | 3,8                          | 10           | 16         |
| 250           | 5,75                         | 12,5         | 23         |
| 1000          | 17                           | 45           | 85         |

Номинальный КПД трансформатора при номинальном режиме и при  $\cos\varphi_2 = 1$ :

$$\eta_H = 1 - \frac{P_0 + P_k}{S_H + P_0 + P_k}.$$

КПД при нагрузке током  $I_2 = \beta I_{2H}$  и заданном  $\cos\varphi_2$ :

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{S_H \beta \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}.$$

На рис. 2.6.1 приведена зависимость  $\eta = f(P_2)$ .

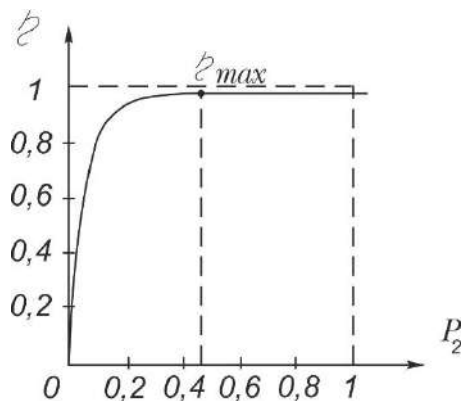


Рис. 2.6.1. Зависимость КПД от выходной мощности

Максимальное значение КПД наступает при такой нагрузке, при которой потери в меди равны потерям в стали.

Относительное значение тока нагрузки при максимальном КПД определяется по формуле:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}$$

Для мощных трансформаторов  $\beta \approx 0,4-0,7$ .

КПД трансформатора высок и достигает порядка 95–99 %.

### 2.6.2. Определение потерь электроэнергии в двухобмоточном трансформаторе

Потери электрической энергии в трансформаторе:

$$\Delta \mathcal{E}_a = P_0 \cdot T_{\Pi} + P_k \cdot \beta^2 \cdot T_{\text{раб}}, \text{ (кВт}\cdot\text{ч)},$$

$$\beta = \frac{\mathcal{E}_a}{S_n \cdot T_{\Pi} \cdot \cos \varphi_{\text{ср}}},$$

где  $P_0$  – мощность холостого хода при номинальном напряжении, кВт;

$P_k$  – мощность короткого замыкания при номинальной нагрузке, кВт;

$\mathcal{E}_a$  – электроэнергия, учтенная за расчетный период по счетчику (кВт·ч);

$T_{\Pi}$  – полное число часов работы трансформатора, ч;

$T_{\text{раб}}$  – число часов работы трансформатора с номинальной нагрузкой, ч  
(в одну смену – 200 ч/мес, в две смены 450 ч/мес, в три смены 700 ч/мес);

$\cos \varphi_{\text{ср}}$  – средневзвешенный коэффициент мощности;

$S_n$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора.

### 2.7. Коэффициент мощности трансформатора

Коэффициент мощности представляет собой отношение активной мощности к полной мощности:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}.$$

Зная полную мощность из паспортных данных, активную мощность можно определить по формуле:

$$P = S \cdot \cos\varphi.$$

Реактивная мощность служит для создания магнитных полей в трансформаторе:

$$Q = S \cdot \sin\varphi.$$

Векторная диаграмма мощностей трансформатора изображена на рис. 2.7.1.

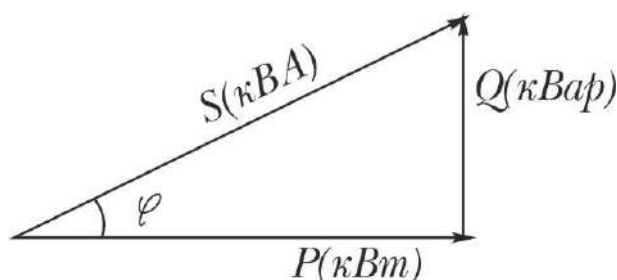


Рис. 2.7.1. Векторная диаграмма мощностей трансформатора

Основными потребителями реактивной мощности на промышленных предприятиях являются асинхронные двигатели (до 70 %) и трансформаторы (до 20 %).

Необходимо применять мероприятия по увеличению реактивной мощности в сети для этих нужд (повышать коэффициент мощности сети).

Важным мероприятием по улучшению коэффициента мощности являются:

- 1) увеличение загрузки асинхронных двигателей до  $k_3 = 0,75 - 1,0$ ;
- 2) уменьшения режимов холостого хода трансформаторов и асинхронных двигателей;
- 3) замена и перестановка незагруженных трансформаторов;
- 4) устранение неравномерного распределения нагрузок фаз трансформаторов.

Слабая нагрузка трансформаторов вызывает значительное снижение коэффициента мощности предприятия. Коэффициент мощности холостого хода трансформаторов составляет порядка 0,1–0,2.

Резкое повышение коэффициента мощности трансформаторов наступает при увеличении загрузки до  $\beta = 0,6-0,8$ . В табл. 2.7.1 на основании данных каталогов приведена зависимость  $\cos\varphi_1 = f(\cos\varphi_2)$ .

Зависимость  $\cos\varphi_1 = f(\cos\varphi_2)$  силовых трансформаторов

| Мощность, кВА | Коэффициент мощности трансформатора на стороне высшего напряжения, $\cos\varphi_1$ |      |      |      |  |      |      |      |  |      |      |      |
|---------------|--|------|------|------|--|------|------|------|--|------|------|------|
|               | При $\cos\varphi_2 = 0,8$ и нагрузке $\beta$                                       |      |      |      | При $\cos\varphi_2 = 0,7$ и нагрузке $\beta$ |      |      |      | При $\cos\varphi_2 = 0,6$ и нагрузке $\beta$ |      |      |      |
|               | 1,0  | 0,75 | 0,5  | 0,25 | 1,0  | 0,75 | 0,5  | 0,25 | 1,0  | 0,75 | 0,5  | 0,25 |
| 63            | 0,76   | 0,75 | 0,72 | 0,65 | 0,66   | 0,64 | 0,62 | 0,55 | 0,56   | 0,55 | 0,52 | 0,46 |
| 100           | 0,77   | 0,76 | 0,74 | 0,68 | 0,67   | 0,65 | 0,64 | 0,58 | 0,57   | 0,56 | 0,54 | 0,50 |
| 160           | 0,77   | 0,76 | 0,74 | 0,68 | 0,67   | 0,65 | 0,64 | 0,58 | 0,57   | 0,56 | 0,55 | 0,50 |
| 320           | 0,77   | 0,76 | 0,74 | 0,68 | 0,67   | 0,65 | 0,64 | 0,58 | 0,57   | 0,56 | 0,55 | 0,50 |
| 630           | 0,77   | 0,76 | 0,74 | 0,68 | 0,67   | 0,65 | 0,64 | 0,58 | 0,57   | 0,56 | 0,55 | 0,50 |
| 1000          | 0,76   | 0,76 | 0,76 | 0,67 | 0,66   | 0,66 | 0,64 | 0,57 | 0,57   | 0,56 | 0,54 | 0,48 |

**Наиболее экономичными средствами повышения коэффициента мощности являются:**

- 1) синхронные двигатели и генераторы, работающие в режиме перевозбуждения;
- 2) статические конденсаторы.

Необходимая мощность компенсирующих устройств:

$$Q_k = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = Q_1 - Q_2 \text{ (кВАр)},$$

где  $P$  – потребляемая активная мощность, кВт;

$Q_1, \operatorname{tg}\varphi_1$  – реактивная мощность и ее коэффициент до компенсации;

$Q_2, \operatorname{tg}\varphi_2$  – реактивная мощность и ее коэффициент после компенсации.

На рис. 2.7.2 изображена схема включения батареи конденсаторов (БК), соединенных в треугольник.

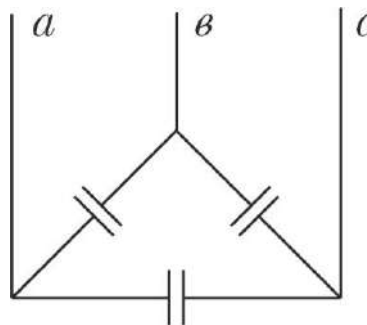


Рис. 2.7.2. Принципиальная схема включения батареи конденсаторов, соединенных в треугольник

Технико-экономические расчеты показывают, что в большинстве случаев групповая компенсация наиболее целесообразна. Например, при включении на шинах низкого напряжения понижающих подстанций синхронных компенсаторов (СК) и конденсаторов (БК) от реактивных токов разгружаются как питающая сеть, так и силовые трансформаторы (рис. 2.7.3).

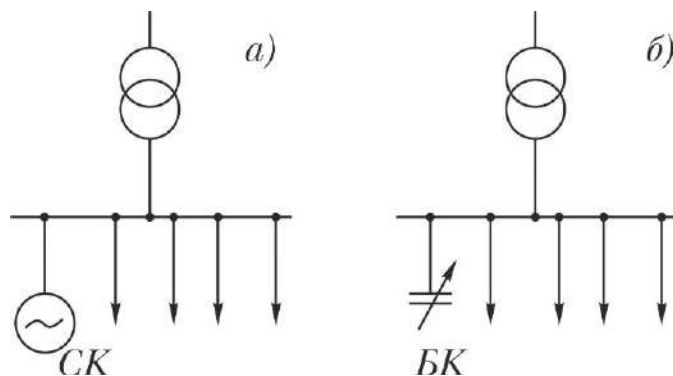


Рис. 2.7.3. Схема включения компенсаторов СК(а) и управляемых батарей конденсаторов БК(б) для снижения реактивных токов и регулирования напряжения

**Пример 2.7.1.** Силовой трансформатор общего назначения с техническими данными:

$S_{\text{H}} = 1000$  кВА,  $U_{1\text{H}} = 10$  кВ,  $U_{2\text{H}} = 0,4$  кВ,  $i_0 = 1,4$  %,  $u_{\text{к}} = 5,5$  %,  $P_0 = 2,45$  кВт,  $P_{\text{к}} = 12,2$  кВт.

Определить:  $K_{\text{T}}$ ,  $I_{1\text{H}}$ ,  $I_{2\text{H}}$ ,  $I_0$ ,  $U_{\text{к}}$ ,  $\cos\varphi_0$ ,  $\cos\varphi_{\text{к}}$ ,  $\beta_{\text{опт}}$ ,  $\eta_{\text{max}}$ ,  $\eta_{\text{H}}$ ,

–  $\eta$  при  $\cos\varphi_2 = 0,7$ ,  $\beta = 0,75$ ;

–  $Q_{\text{к}}$  при повышении  $\cos\varphi$  от 0,7 до 0,97,  $\beta = 0,75$ .

### Решение

1. Коэффициент трансформации:

$$K_{\text{T}} = \frac{U_{1\text{H}}}{U_{2\text{H}}} = \frac{10}{0,4} = 25.$$

2. Номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{1\text{H}} = \frac{1000}{\sqrt{3}U_{1\text{H}}} = \frac{1000}{1,73 \cdot 10} = 57,7 \text{ (A)}.$$

3. Номинальный ток вторичной обмотки:

$$I_{2\text{H}} = I_{1\text{H}} \cdot K_{\text{T}} = 57,7 \cdot 25 = 1443 \text{ (A)}.$$

4. Ток холостого хода:

$$I_0 = \frac{i_0 \cdot I_{1\text{H}}}{100} = \frac{1,4 \cdot 57,7}{100} = 0,81 \text{ (A)}.$$

Напряжение короткого замыкания:

$$U_{\text{к}} = \frac{u_{\text{к}} \cdot U_{1\text{к}}}{100} = \frac{5,5 \cdot 10}{100} = 0,55 \text{ кВ}.$$

5. Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{H}} \cdot I_0} = \frac{2,45}{1,73 \cdot 10 \cdot 0,81} = 0,175.$$

Коэффициент мощности короткого замыкания:

$$\cos\varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k} = \frac{12,2}{1,73 \cdot 0,55 \cdot 57,7} = 0,22.$$

6. Оптимальный коэффициент нагрузки:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{2,45}{12,2}} = 0,45.$$

7. Максимальный КПД трансформатора:

$$\eta_{\text{max}} = 1 - \frac{2P_0}{2 \cdot P_0 + \beta_{\text{опт}} \cdot S_H} = 1 - \frac{2 \cdot 2,45}{2 \cdot 2,45 + 0,45 \cdot 1000} = 0,99.$$

8. Номинальный КПД трансформатора ( $\cos(\varphi_2) = 1$ ):

$$\eta_H = 1 - \frac{P_0 + P_k}{P_0 + P_k + S_H} = 1 - \frac{2,45 + 12,2}{2,45 + 12,2 + 1000} = 0,985.$$

9. КПД при  $\cos\varphi_2 = 0,7$ ,  $\beta = 0,75$ :

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + P_k \cdot \beta^2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 + P_0 + P_k \cdot \beta^2} = 1 - \frac{2,45 + 0,75^2 \cdot 12,2}{0,75 \cdot 1000 \cdot 0,7 + 0,75^2 \cdot 12,2} = 0,983.$$

10. Компенсирующая мощность, необходимая для повышения коэффициента мощности от 0,7 до 0,97 ( $\beta = 0,75$ ):

$$Q_k = P_2(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = 525(1,02 - 0,25) = 404 \text{ кВАр};$$

$$P_2 = \beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 = 525 \text{ кВт};$$

$$\cos\varphi_1 = 0,7, \text{ значит } \operatorname{tg}\varphi_1 = 1,02;$$

$$\cos\varphi_2 = 0,97, \text{ значит } \operatorname{tg}\varphi_2 = 0,25.$$

## 2.8. Аналогия между трансформатором и асинхронным двигателем

Между обмотками статора и ротора асинхронного двигателя (АД) осуществляется постоянная трансформаторная связь. При этом аналогия между трансформатором и АД далеко не полная. Основные отличия состоят в следующем:

1) в трансформаторе обмотка каждой фазы расположена на отдельном стержне, а фазные обмотки АД имеют пространственный сдвиг осей и заложены в пазах одного якорного сердечника, поэтому в сердечнике 3-фазного АД поток вращается, а в сердечнике 3-фазного трансформатора пульсирует;

2) в трансформаторе нагрузка подключена к вторичной обмотке, а в АД вторичная обмотка замкнута накоротко;

3) в трансформаторе первичная и вторичная обмотки неподвижны, а у АД обмотка ротора перемещается относительно обмотки статора, в результате  $E_2$  и  $f_2$  переменные и зависят от скольжения  $S$ ;

4) в обмотках вращающегося АД кроме трансформации напряжения  $U_2$  происходит преобразование частоты  $f_2$ . В результате взаимодействия полей статора и ротора вращается ротор и происходит преобразование электрической энергии  $P_1$  в механическую энергию  $P_2$ ;

5) в магнитопроводе АД имеется большой воздушный зазор. В результате параметры ветвей намагничивания у АД и трансформатора различны. Ток холостого хода АД достигает 20–50 %, а у силового трансформатора 2–5 % от номинального тока.

## 2.9. Параллельная работа трансформаторов

Параллельным включением называется такое включение, когда первичные обмотки подключаются к одним общим шинам, питающим трансформатор, а вторичные обмотки к другим общим шинам, распределяющим энергию потребителям (рис. 2.9.1).

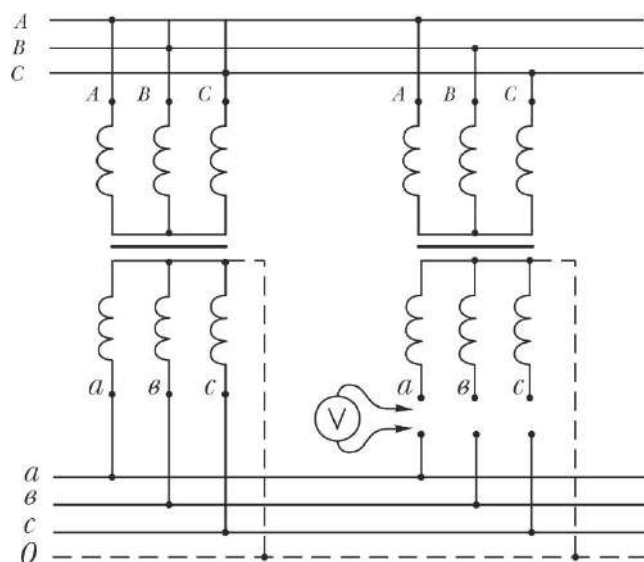


Рис. 2.9.1. Схема фазирования трансформаторов перед включением на параллельную работу

После фазировки перед включением на параллельную работу должны соблюдаться следующие условия:

1. Равенство номинальных напряжений трансформаторов (напряжений обмоток высшего и низшего напряжений). Допускается различие не более 0,5 %.

2. Равенство напряжений короткого замыкания  $U_k$ . Допускается отклонение  $U_k$  не более  $\pm 10$  %.

Это требование объясняется тем, что трансформаторы должны делить нагрузку между собой пропорционально их номинальным мощностям.

3. Одинаковые группы соединений трансформаторов.

4. Отношение номинальных мощностей не более 3:1.

При несоблюдении условия 1:

а) во внутренней цепи параллельно включенных трансформаторов образуется уравнивающий ток;

б) уравнивающий ток  $I_{ур}$  выравнивает напряжение на вторичных зажимах обоих трансформаторов, однако вызывает при этом перегрузку одного из трансформаторов при недогрузке другого (трансформатор с более высоким вторичным напряжением холостого хода примет на себя большую нагрузку).

При несоблюдении условия 2 общая нагрузка на трансформаторы распределится пропорционально их номинальным мощностям и обратно пропорционально  $U_K$ .

При равных  $S_n$  трансформатор с меньшим  $U_K$  перегружается, трансформатор с большим  $U_K$  недогружается.

При несоблюдении условия 3 во вторичной цепи трансформаторов появится уравнивающий ток:

$$I_{ур} = \frac{200 \sin \Delta / 2}{U_{K1}/I_{H1} + U_{K2}/I_{H2}},$$

где  $\Delta$  – разность угловых смещений, град;

$U_{K1} U_{K2}$  – напряжения короткого замыкания трансформаторов;

$I_{H1}, I_{H2}$  – номинальные токи трансформаторов.

Соблюдение условий 1 и 3 исключает появление тока  $I_{ур}$  при холостом ходе в обмотках трансформаторов при их включении на параллельную работу:

$$I_{ур} = \frac{\Delta U}{Z_{K1} + Z_{K2}},$$

где  $\Delta U$  – разность потенциалов между вторичными обмотками трансформаторов;

$Z_{K1}, Z_{K2}$  – сопротивление короткого замыкания трансформаторов.

**Пример 2.9.1.** Общая нагрузка двух параллельно работающих трансформаторов составляет 2,0 кА. Трансформатор № 1 – 800 кВА,  $U_{K1}$  – 5,9 %, а трансформатор № 2 – 1000 кВА,  $U_{K2}$  – 5,7 %.

Определить нагрузку каждого трансформатора.

**Решение**

1.  $K_1 = 800 / 5,9 = 135,6$  ед.

2.  $K_2 = 1000 / 5,7 = 175,4$  ед.

3.  $I_1 = \frac{2,0 \cdot K_1}{K_1 + K_2} = \frac{2,0 \cdot 135,6}{135,6 + 175,4} = 0,87$  кА.

4.  $I_2 = I - I_1 = 2,0 - 0,87 = 1,13$  кА.

## 2.10. Проверка маркировки обмоток трансформатора

### 1. Обмотки высокого напряжения (ВН)

Обмотку ВН, соединенную в  $Y$ , подключают фазой  $B_y$  к однофазному источнику переменного тока пониженного напряжения и измеряют напряжения и ЭДС (рис. 2.10.1 а).

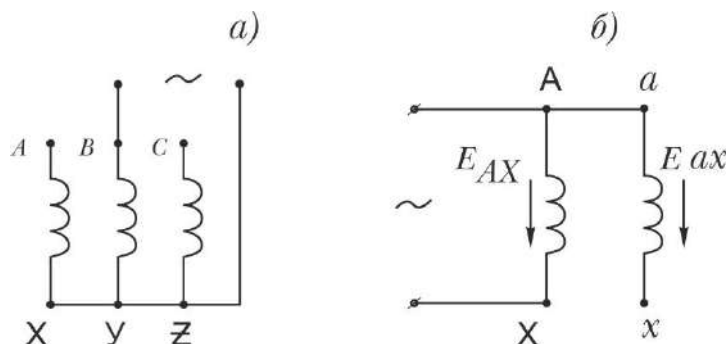


Рис. 2.10.1. Проверка маркировки обмоток:  
а) высокого напряжения; б) низкого напряжения

При правильной маркировке:

$$U_{AB} = U_{BC} = 1,5U_{\text{вы}};$$

при неправильной маркировке:

$$U_{AB} = 0,5U_{\text{вы}}.$$

### 2. Обмотки низкого напряжения (НН)

Обмотки НН проверяют для каждой фазы, подключая поочередно к источнику переменного тока пониженного напряжения (рис. 2.10.1 б).

При правильной маркировке:

$$U_{Xx} = U_{AX} - U_{ax};$$

при неправильной, наоборот, сумма ЭДС:

$$U_{Xx} = U_{AX} + U_{ax}.$$

## 2.11. Группы соединений обмоток

### Общие сведения

Стандартизованы группы  $Y/Y_0 - 12$ ,  $Y/\Delta - 11$ ,  $Y_0/\Delta - 11$  с выводом, в случае надобности, нулевой точки звезды [8].

Группа соединения обмоток трансформатора характеризуется угловым смещением векторов линейных ЭДС обмотки низкого напряжения по отношению к векторам линейных ЭДС обмотки высокого напряжения (рис. 2.11.1).

| Схемы соединения обмоток |    | Диаграммы векторов ЭДС |    | Условные обозначения |
|--------------------------|----|------------------------|----|----------------------|
| ВН                       | НН | ВН                     | НН |                      |
|                          |    |                        |    | $Y/\varnothing - 0$  |
|                          |    |                        |    | $Y/\Delta - 11$      |

Рис. 2.11.1. Схемы и группы соединения обмоток двухобмоточных трансформаторов

Группа обозначается числом, которое следует умножить на  $30^\circ$  (угловое смещение, принятое за единицу) для получения угла смещения в градусах. Угол смещения всегда отсчитывается от вектора линейной ЭДС ВН по часовой стрелке до одноименного вектора ЭДС НН.

### Определение группы соединения обмоток

#### 1-й способ (способ вольтметра)

Два одноименных зажима высшего и низшего напряжений (например, А и а) соединяются перемычкой. К обмотке низшего напряжения подводят пониженное симметричное 3-х фазное напряжение (рис. 2.11.2) и производят измерение напряжений  $U_{вв}$ ,  $U_{сс}$ ,  $U_{св}$  между зажимами вВ, сС, сВ.

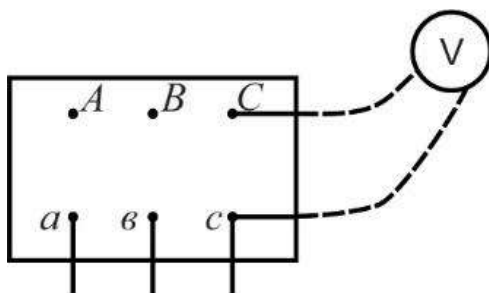


Рис. 2.11.2. К определению группы соединений (способ вольтметра)

Напряжения  $U_{вв}$ ,  $U_{сс}$  должны быть одинаковы. Затем определяют, будет ли напряжение равно (р), больше (б), или меньше (м) напряжения  $U_{св}$ , и по таблице определяют группу соединений (табл. 2.11.1).

## Определение группы соединений

| Группа соединений | $U_{вв} = U_{сс}$            | $U_{св}$ |
|-------------------|------------------------------|----------|
| 1                 | $\sqrt{k^2 - k\sqrt{3} + 1}$ | б        |
| 2                 | $\sqrt{k^2 - k + 1}$         | б        |
| 3                 | $\sqrt{k^2 + 1}$             | б        |
| 4                 | $\sqrt{k^2 + k + 1}$         | б        |
| 5                 | $\sqrt{k^2 + k\sqrt{3} + 1}$ | р        |
| 6                 | $K+1$                        | –        |
| 7                 | $\sqrt{k^2 + k\sqrt{3} + 1}$ | м        |
| 8                 | $\sqrt{k^2 + k + 1}$         | м        |
| 9                 | $\sqrt{k^2 + 1}$             | м        |
| 10                | $\sqrt{k^2 - k + 1}$         | м        |
| 11                | $\sqrt{k^2 - k\sqrt{3} + 1}$ | р        |
| 12                | $K-1$                        | –        |

$$K = U_{1л}/U_{2л}$$

Группу соединений можно определить прямым методом (фазометром).

### 2-й способ (способ фазометра)

Последовательная обмотка фазометра присоединяется к выводам одной обмотки, а параллельная обмотка – к одноименным выводам другой обмотки (рис. 2.11.3) [37, 39].

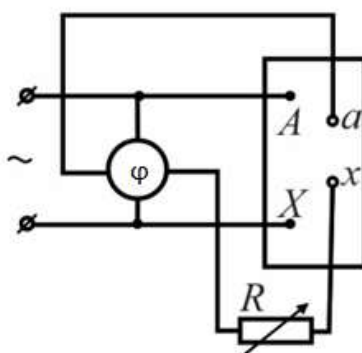


Рис. 2.11.3. К определению группы соединений (способ фазометра)

Величина подводимого напряжения должна обеспечивать нормальную работу фазометра. По измеренному углу определяют группу соединения обмоток. Предварительно проверяют порядок чередования фаз.

**3-й способ (метод двух вольтметров) описан в [39].**

**4-й способ (метод постоянного тока) приведен в [37, 39].**

## **2.12. Регулирование и стабилизация напряжения трансформатора**

В соответствии с ГОСТ 11677 и стандартами на трансформаторы различных классов напряжения и диапазонов мощностей большинство силовых масляных трансформаторов допускает регулирование или стабилизацию напряжения на одной или двух обмотках. Регулирование осуществляется переключением ответвлений обмотки ВН посредством переключателя. Различают трансформаторы, переключаемые без возбуждения (ПБВ) и регулируемые под нагрузкой (РПН). Допускается ПБВ только в том случае, когда все обмотки отключены от сети, и осуществляется вручную или посредством привода. РПН осуществляется на возбужденном и нагруженном трансформаторе без перерыва нагрузки и без отключения его от сети при автоматическом или ручном дистанционном управлении.

В трансформаторах ПБВ напряжение регулируется ступенями  $\pm(2-2,5) \%$ , то есть 95; 97,5; 100; 102,5 и 105 % от  $U_{\text{ном}}$ . В трансформаторах РПН регулирование осуществляется в пределах  $\pm(9-16) \%$  при числе ступеней в положительном и отрицательном направлениях по 6, 8, 9 и 10. Трансформаторы РПН значительно дороже эквивалентных по мощности трансформаторов ПБВ.

Регулирование напряжения у сухих трансформаторов осуществляется путем перестановки контактных пластин на панели переключения.

## **2.13. Выбор силовых трансформаторов**

### **2.13.1. Выбор числа трансформаторов**

Главные понижающие подстанции и цеховые подстанции желательно выполнять с числом трансформаторов  $n_T = 2$ . Остальные решения (подстанции с тремя и большим числом трансформаторов) являются обычно более дорогими. Они могут быть необходимы в случае питания потребителей, требующих разных напряжений.

**Потребители первой категории** должны иметь питание от двух независимых источников. На цеховых подстанциях с двумя трансформаторами рабочие секции шин низкого напряжения целесообразно держать в работе отдельно. При таком режиме  $I_{\text{к.з.}}$  уменьшается в 2 раза. При отключении одного из работающих трансформаторов второй принимает на себя нагрузку отключившегося автоматически.

**Потребители второй категории** должны быть обеспечены резервом, вводимым автоматически или дежурным персоналом. При питании от одной подстанции следует иметь два трансформатора или «складской» ре-

зерв. На время замены трансформатора может вводиться ограничение питания потребителей с учетом допустимой перегрузки оставшегося в работе трансформатора.

**Потребители третьей категории** могут получать питание от однотрансформаторной подстанции при наличии «складского» резерва.

### 2.13.2. Выбор мощности трансформаторов

Как правило, необходимая мощность предприятия растет из года в год. Поэтому целесообразно предусматривать возможности установки трансформаторов большей на одну ступень мощности. Например, если устанавливаются два трансформатора по 6300 кВА, то фундаменты и конструкции должны предусматривать установку двух трансформаторов по 10000 кВА без существенных переделок подстанции.

Покрытие потребностей может осуществляться не только за счет использования номинальной мощности трансформаторов, но и за счет их перегрузочной способности.

### 2.13.3. Выбор мощности трансформаторов с учетом перегрузки

#### А. Перегрузка аварийная

В аварийных случаях допускается кратковременная перегрузка трансформаторов сверх номинальной при всех системах охлаждения независимо от предшествующего режима и температуры охлаждающей среды в соответствии с табл. 2.13.3.1 [32].

Таблица 2.13.3.1

Длительность перегрузки трансформаторов

| Нагрузка<br>в долях<br>номинальной<br>по току | Длительность,<br>мин  |       | Нагрузка<br>в долях<br>номинальной<br>по току | Длительность,<br>мин  |       |
|---|-----------------------|-------|---|-----------------------|-------|
|   | Маслона-<br>полненные | Сухие |   | Маслона-<br>полненные | Сухие |
| 1,2   |                       | 60    | 1,5   | 70                    | 18    |
| 1,3   | 120                   | 45    | 1,6   | 45                    | 5     |
| 1,4   | 90                    | 32    | 1,75  | 20                    | –     |
|   |                       |       | 2,0   | 10                    | –     |

Если нагрузка трансформатора (для систем охлаждения М, Д, ДЦ и Ц) до аварийной перегрузки не превышала 0,93 его паспортной мощности, его можно перегружать на срок до 5 суток на 40 %. При этом продолжительность перегрузки каждые сутки не должна превышать 6 часов (суммарная продолжительность перегрузки подряд или с разрывами).

#### Б. Перегрузка систематическая

Допустимую дополнительную нагрузку трансформатора  $S_{\text{доп}}$  (кВА) в часы максимальной нагрузки сверх номинальной за счет неполного использования в течение остального времени суток можно определить по формуле:

$$S_{\text{доп}} = S_{\text{нТП}}(1 - K_{3Г}) \cdot 0,3,$$

где  $S_{\text{нТП}}$  – номинальная паспортная мощность трансформатора для условий  $\theta_{\text{сГ}} = + 5 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\theta_{\text{0В}} = + 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$K_{3Г}$  – коэффициент заполнения графика.

Допускается перегрузка в зимнее время на 1 % на каждый процент недогрузки в летнее время, но всего не более чем на 15 %. Общая перегрузка не должна превышать 30 %:

$$S_{\text{доп}} \leq 1,3S_{\text{нТП}}.$$

#### 2.13.4. Определение мощности трансформатора с учетом потерь

Для трансформаторов  $S_{2\text{ном}} = 100 \div 6300$  кВА активные потери составляют около 2 %, а реактивные потери около 10 % номинальной мощности трансформатора.

Общая расчетная мощность трансформатора:

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = S_2 \sqrt{(\text{Cos}\varphi_2 + 0,02)^2 + (\text{Sin}\varphi_2 + 0,1)^2},$$

или  $S_1 = k \cdot S_2$ .

Значение коэффициента  $K$  при различных  $\text{Cos}\varphi_2$  приводится в табл. 2.13.4.1.

Таблица 2.13.4.1

Значение коэффициента  $K$

|                       |      |      |      |       |      |
|-----------------------|------|------|------|-------|------|
| $\text{Cos}\varphi_2$ | 1,0  | 0,9  | 0,8  | 0,7   | 0,6  |
| $K$                   | 1,02 | 1,06 | 1,08 | 1,085 | 1,09 |

#### 2.14. Определение мощности трансформатора при несимметричной нагрузке

Коэффициент перегрузки, допустимой в несимметричном режиме, определится:

$$K_{\text{пнр}} = \frac{I_A}{I_{\text{нТ}}} = \frac{1,53}{\sqrt{1 + 0,45 \left[ 1 + \left( \frac{I_B}{I_A} \right)^2 + \left( \frac{I_C}{I_A} \right)^2 \right]}}$$

где  $I_A$  – ток наиболее нагруженной фазы;

$I_{\text{нТ}}$  – номинальный ток фазы трансформатора;

$I_B, I_C$  – токи в двух других фазах, нагруженных меньше фазы А;

$I_B = I_C = 0,5I_A$ ,

тогда:

$$I_A = I_{\text{н}} \cdot \frac{1,53}{\sqrt{1 + 0,45[1 + 0,5^2 + 0,5^2]}} = 1,18I_{\text{н}}.$$

$I_C = 0$ ;  $I_A = I_B$ , тогда:

$$I_A = I_H \cdot \frac{1,53}{\sqrt{1 + 0,45(1 + 1)}} = 1,1I_H.$$

## 2.15. Предельная мощность трансформаторов цеховых подстанций

Предельной номинальной мощностью цеховой КТП, приводящей в КТП к минимальным капитальным вложениям на 1 кВА, является мощность 1000 кВА. Применение КТП с трансформаторами 1600 и 2500 кВА оправдывается серьезными техническими соображениями (необходимость обеспечения пуска крупных двигателей, наличие больших сосредоточенных нагрузок на малой площади и т.п.) и малой протяженностью сети низшего напряжения. Снижение номинальной мощности трансформаторов также приводит к росту капиталовложений и приведенных затрат в сетевые узлы.

## 2.16. Специальные трансформаторы

### *Автотрансформаторы*

Автотрансформатором (АТ) называется такой трансформатор, у которого обмотка низшего напряжения является частью обмотки высшего напряжения (рис. 2.16.1).

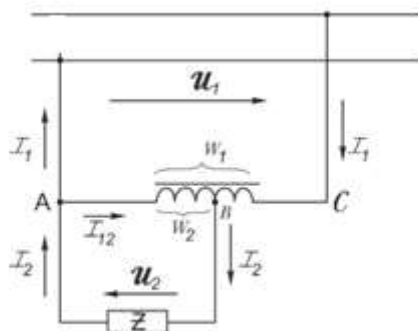


Рис. 2.16.1. Схема однофазного понижающего автотрансформатора

1. АТ бывают однофазные и трехфазные, понижающие и повышающие. Коэффициент трансформации АТ:

$$K_{AT} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

По виткам общей части обмотки протекает ток:

$$I_{12} = I_2 - I_1.$$

Мощность, передаваемая во вторичную цепь:

$$S_2 = U_2 I_2 = U_2 (I_{12} + I_1) = U_2 I_{12} + U_2 I_1 = S_M + S_Э,$$

где  $S_M = U_2 I_{12}$  – мощность, поступающая во вторичную цепь магнитным путем;

$S_Э = U_2 I_1$  – мощность, поступающая во вторичную цепь электрическим путем.

Преимуществом АТ перед обычным трансформатором является меньший расход меди, меньший расход электротехнической стали, меньший вес и меньшая стоимость.

При  $K_{АТ} \geq 2$  достоинства АТ исчезают, и становится выгодным применение обычного трансформатора. Поэтому, обычно  $K_{АТ} = 1,25-2$ .

Недостатками АТ являются большие токи короткого замыкания и электрическая связь между первичной и вторичной цепями.

АТ применяются для пуска мощных двигателей переменного тока, для ступенчатого регулирования напряжения электрических печей, а также в лабораторной практике (ЛАТР) для плавной регулировки вторичного напряжения.

## 2.17. Измерительные трансформаторы

В сетях переменного тока для отделения измерительных приборов в целях безопасности от проводов высокого напряжения, а также для расширения пределов измерения приборов применяются измерительные трансформаторы напряжения (ТН) и тока (ТТ):

$$K_H = \frac{U_1}{U_2},$$

где  $K_H$  – указывается на паспорте трансформатора в виде дроби, например 6000/100 ( $K_H = 60$ ).

Согласно ГОСТ 1983 все ТН имеют вторичное напряжение  $U_2 = 100$  В. Номинальные мощности ТН составляют 200–2000 ВА.

ТН изготавливаются однофазными и трехфазными. Условное обозначение ТН приведено на рис. 2.17.1 а.

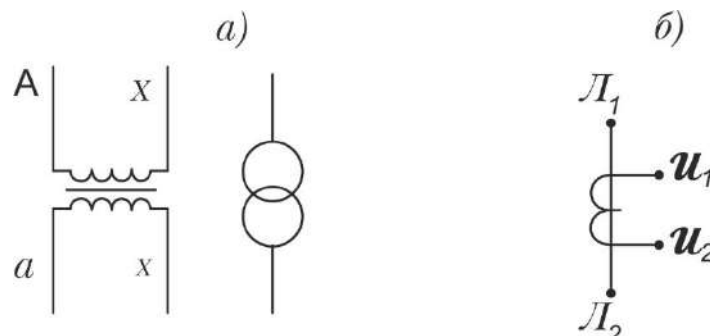


Рис. 2.17.1. Условные обозначения измерительных трансформаторов: а) трансформаторов напряжения; б) трансформаторов тока

ТН служат для измерения напряжения в высоковольтных сетях, для подключения реле напряжения ручных и автоматических приводов, частотомеров, сигнальных ламп, для питания параллельных обмоток ваттметров, счетчиков, фазометров, для контроля изоляции.

Трансформаторы тока служат для преобразования тока большой величины в ток малой величины. Вторичная обмотка ТТ выполняется обычно на ток 5 А, первичные номинальные токи от 5 А до 15000 А.

Коэффициент трансформации ТТ:

$$K_T = \frac{I_1}{I_2}.$$

$K_T$  указывается на паспорте в виде дроби, например 150/5 ( $K_T = 30$ ).

При протекании тока по первичной обмотке размыкать вторичную обмотку нельзя, так как это вызовет перегрев сердечника и повышенное напряжение (500–1000 В) на вторичной обмотке. Поэтому вторичная обмотка должна быть всегда замкнута на приборы или накоротко. Допускаемая нагрузка ТТ находится в пределах 15–75 ВА.

В зависимости от назначения ТТ делятся на стационарные и переносные. Последние изготавливаются с несколькими  $K_T$ , например, токоизмерительные клещи.

Условное обозначение ТТ приведено на рис. 2.17.1 б.

ТТ служат для включения амперметров, последовательных обмоток ваттметров, счетчиков, фазометров, токовых реле.

## 2.18. Сварочные трансформаторы и инверторы

Трансформаторы для электросварки представляют собой специальные аппараты и применяются не только для сварки, но и для резки и наплавки электрической дугой.

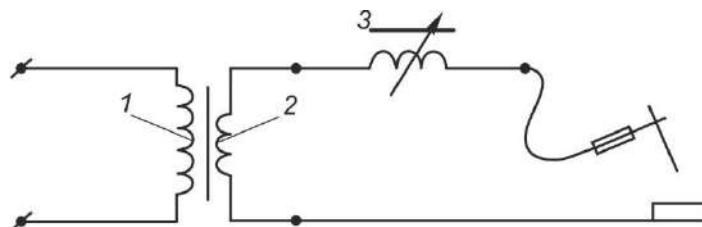


Рис. 2.18.1. Схема включения сварочного трансформатора

Первичная обмотка 1 (рис. 2.18.1) рассчитана на 220 В или 380 В. Вторичная обмотка 2, соединенная последовательно с отдельной реактивной катушкой 3, имеет при холостом ходе 50–70 В и при нагрузке 30 В. Сварочный ток регулируется изменением воздушного зазора катушки 3.

Внешняя характеристика сварочного трансформатора  $U_2 = f(I_2)$  представлена на рис. 2.18.2.

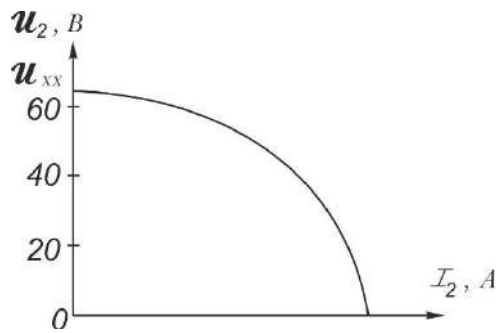


Рис. 2.18.2. Внешняя характеристика  $U_2 = f(I_2)$  сварочного трансформатора

По назначению трансформаторы различают:

- для ручной сварки;
- автоматической сварки под флюсом;
- электрошлаковой сварки;
- сварки в защитных газах.

По току трансформаторы подразделяются:

- для токов 100–150 А;
- до 400 А;
- до 2000–2500 А.

КПД трансформаторов составляет порядка 0,8–0,9, а коэффициент мощности – 0,5–0,6.

Сварочные инверторы, например САИ–250, проще в настройке и эксплуатации. Аппарат имеет такие функции, как легкий поджиг дуги и антизалипание электрода. Инвертор САИ–250 (рассчитан на 250 А) экономичен, компактен и легок (5 кг).

## 2.19. Упрощенный расчет однофазного трансформатора

Вторичная полная мощность:

$$S_2 = U_2 I_2 \text{ ВА.}$$

По известной  $S_2$  определяют первичную мощность трансформатора (рис. 2.19.1).

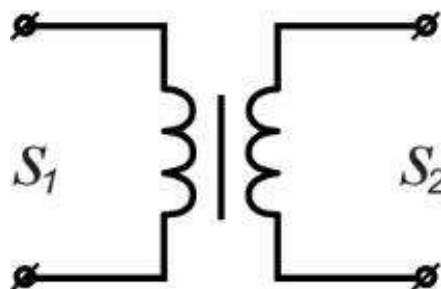


Рис. 2.19.1. К расчету первичной мощности

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta},$$

где  $\eta$  – КПД трансформатора, который можно принимать по табл. 2.19.1.

Таблица 2.19.1

КПД трансформатора

| $S_2$ ВА | $\eta$    |
|----------|-----------|
| 15–50    | 0,5–0,8   |
| 50–150   | 0,8–0,9   |
| 150–300  | 0,9–0,93  |
| 300–1000 | 0,93–0,95 |
| 1000     | 0,95–0,98 |

Сечение стержня сердечника трансформатора:

– для трансформаторов стержневого типа (рис. 2.19.2):

$$Q = \sqrt{S_1} \text{ (см}^2\text{)}.$$

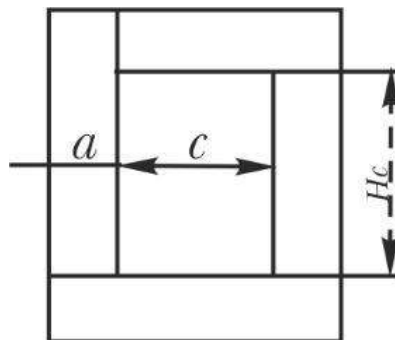


Рис. 2.19.2. К расчету стержневого трансформатора

– броневое типа (рис. 2.19.3):

$$Q_c = 0,7\sqrt{S_1}.$$

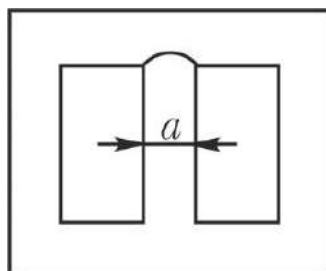


Рис. 2.19.3. К расчету броневое трансформатора

Сечение сердечника может быть выражено через геометрические размеры:

$$Q_c = ab \text{ (см}^2\text{)},$$

где  $a$  – ширина пластины, см;

$b$  – толщина пакета пластин, см.

Высоту прямоугольного стержня трансформатора можно вычислить по формуле:

$$H_c = (2,5 \div 3,5) \cdot a, \text{ см.}$$

Соотношение размеров сечения сердечника может находиться в пределах  $\frac{b}{a} = 1,5 \div 2$ .

Ширину окна сердечника (см. рис. 2.19.2, рис. 2.19.3) принимают по формуле:

$$C = \frac{H_c}{K},$$

где  $K = 2,5 \div 3$ .

Сечение ярма трансформатора броневого типа должно быть не меньше половины сечения стержня.

Токи в обмотках:

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1}; \quad I_2 = \frac{S_2}{U_2};$$

Сечение проводов обмоток:

$$q_1 = \frac{I_1}{\delta}; \quad q_2 = \frac{I_2}{\delta};$$

где  $\delta$  – плотность тока в обмотке:

$$\delta = 1,3 \div 3,2 \text{ А/мм}^2.$$

Большая плотность тока принимается для трансформаторов с хорошей вентиляцией, для трансформаторов внутренней установки  $\delta \leq 2 \text{ А/мм}^2$ . При сечении проводов  $q > 10 \text{ мм}^2$  для обмотки трансформаторов следует использовать провод прямоугольной формы.

Количество витков для частоты 50 Гц определяют по формуле:

$$\omega_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{222 \cdot B_c \cdot Q_c},$$

где  $B_c$  – величина магнитной индукции в сердечнике (табл. 2.19.2):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad \omega_2 = \frac{\omega_1 U_2}{U_1}.$$

Радиолюбители обычно определяют количество витков на один вольт рабочего напряжения по формуле:

$$\omega_0 = \frac{55}{Q_c},$$

где 55 – постоянная величина для трансформаторной стали среднего качества;

$\omega_0$  – количество витков на 1 В рабочего напряжения, тогда:

$$\omega_1 = \omega_0 U_1, \quad \omega_2 = (1,05 \div 1,1) \omega_0 U_2,$$

где  $1,05 \div 1,1$  – коэффициент, учитывающий поправку на падение напряжения в активном сопротивлении провода обмоток и потери в стали.

Таблица 2.19.2

Допустимая магнитная индукция в стержне

| Марка стали                   | Магнитная индукция, Вс (Т)                       |
|-------------------------------|--|
| Э41, Э42, Э310, Э320,<br>Э330 | В сухих трансформаторах<br>0,9–1,0<br>1,0–1,2    |
| 341, 342, Э310, Э320,<br>Э330 | В масляных трансформаторах<br>0,9–1,2<br>1,1–1,5 |

После расчета основных параметров трансформатора производят проверку, разместятся ли обмотки в окне выбранного сердечника. Для этого по наружному диаметру провода и числу витков находим площадь, занимаемую каждой обмоткой в окне сердечника, складываем площади всех обмоток и полученную сумму сравниваем с площадью окна. Считается, что размеры обмоток соответствуют размерам окна, если сумма площадей обмоток составляет не более 0,7 от площади окна.

Площадь, занимаемая каждой обмоткой, приближенно равна

$$F_{\text{обм}} = d_{\text{у}}^2 \omega,$$

где  $d_{\text{у}}$  – диаметр провода с изоляцией;

$\omega$  – количество витков обмотки.

**Пример 2.19.1.** Рассчитать понижающий трансформатор с сердечником стержневого типа для питания от сети 220 В, вторичное напряжение 127 В, сила тока нагрузка 5А.

**Решение**

1. На основании заданной нагрузки подсчитываем вторичную полную мощность трансформатора:

$$S_2 = U_2 I_2 = 127 \cdot 5 = 635 \text{ ВА.}$$

2. Первичная полная мощность трансформатора:

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta} = \frac{635}{0,94} = 675 \text{ ВА.}$$

3. Сечение сердечника:

$$Q_c = \sqrt{S_1} = \sqrt{675} = 26 \text{ см}^2.$$

Принимаем его размеры:

ширина стержня  $a = 4$  см;

высота стержня  $H_c = 3 \cdot a = 12$  см;

ширина окна  $C = \frac{H_c}{K} = \frac{12}{3} = 4$  см;

толщина пакета пластин  $b = 6,5$  см.

Фактическое сечение выбранного сердечника:

$$Q_{сф} = ab = 4 \cdot 6,5 = 26 \text{ см}^2.$$

4. Определяем силу тока первичной обмотки:

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{675}{220} = 3,07 \text{ А.}$$

5. Определяем сечение провода первичной и вторичной обмоток, исходя из плотности тока, равной  $2 \text{ А/мм}^2$ :

$$q_1 = \frac{I_1}{\delta} = \frac{3,07}{2} = 1,535 \text{ мм}^2;$$

$$q_2 = \frac{I_2}{\delta} = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ мм}^2.$$

Принимаем для обмоток провода ПЭВ – 1

диаметр провода без изоляции  $d_1 = 1,4$  мм,  $d_2 = 1,81$  мм;

диаметр провода с изоляцией  $d_{u1} = 1,48$  мм,  $d_{u2} = 1,9$  мм;

сечение провода без изоляции  $q_1 = 1,539 \text{ мм}^2$ ,  $q_2 = 2,57 \text{ мм}^2$ .

6. Определяем количество витков обмоток (сталь Э41,  $B_c = 0,9 \text{ Тл}$ ):

$$\omega_1 = \frac{220 \cdot 10^4}{222 \cdot 0,9 \cdot 26} = 424;$$

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{U_2}{U_1} = 424 \cdot \frac{127}{220} = 244.$$

7. Площадь, занимаемая обмотками:

$$F_{обм} = F_{обм1} + F_{обм2} = 927 + 880 = 1807 \text{ мм}^2;$$

$$F_{обм1} = d_{u1}^2 \omega_1 = 1,48^2 \cdot 424 = 927 \text{ мм}^2;$$

$$F_{обм2} = d_{u2}^2 \omega_2 = 1,9^2 \cdot 244 = 880 \text{ мм}^2.$$

Площадь окна сердечника  $H_c \cdot C = 120 \cdot 40 = 4800 \text{ мм}^2$ .

Отношение расчетной и фактической площадей окна сердечника составит:

$$\frac{1807}{4800} = 0,37 < 0,7.$$

Следовательно, обмотки свободно разместятся в окне выбранного сердечника трансформатора.

## 2.20. Расчет однофазного автотрансформатора

Исходными величинами для расчета автотрансформатора служат напряжение и частота питающей сети, а также мощность и напряжение вторичной обмотки. Расчетная мощность определяется по формулам:

– для понижающего автотрансформатора (рис. 2.20.1):

$$S_{2t} = S_2 \left( \frac{n-1}{n} \right), \text{ ВА};$$

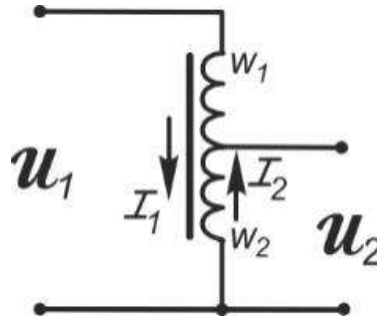


Рис. 2.20.1. К расчету понижающего автотрансформатора

– для повышающего автотрансформатора (рис. 2.20.2):

$$S_{2t} = S_2(1-n), \text{ ВА},$$

где  $n = \frac{U_1}{U_2}$  – коэффициент трансформации;

$U_1, U_2$  – первичное и вторичное напряжение автотрансформатора, В;

$S_2 = U_2 \cdot I_2$  – мощность вторичной обмотки, ВА.

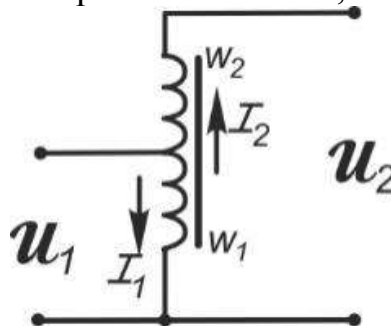


Рис. 2.20.2. К расчету повышающего автотрансформатора

Токи в отдельных частях обмотки могут быть определены из выражений:

$$I_1 = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1}, \text{ А}; \quad I_2 = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{U_2}, \text{ А};$$

$$\eta = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{S_2 \cos \varphi_1 + K^1 S_{2t}}$$

где  $\cos \varphi_2 = 1$  (при активной нагрузке),  $\cos \varphi_1 = 0,85-0,95$ ,

$K^1$  – коэффициент, характеризующий электромагнитные потери (рис. 2.20.3).

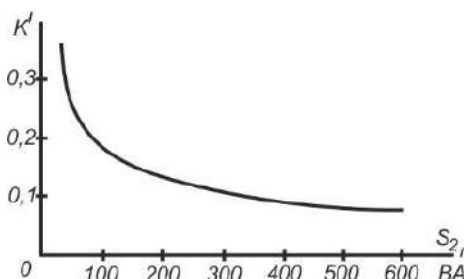


Рис. 2.20.3. К определению коэффициента электромагнитных потерь

Зная  $S_{2t}$ , находим поперечное сечение стержня автотрансформатора:

$$Q_c = 3 \sqrt{\frac{S_{2t}}{\delta}} \text{ см}^2,$$

где  $\delta$  – плотность тока в обмотке автотрансформатора (см. табл. 2.20.1).

Таблица 2.20.1

Зависимость плотности тока от мощности

| Мощность автотрансформатора, ВА | Плотность тока, А/мм <sup>2</sup> |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| До 100                          | 3,5–4,5                           |
| Более 100                       | 2,5–3,5                           |

Сечение проводов в отдельных частях первичной и вторичной обмоток определяют для понижающего автотрансформатора (рис. 2.20.1):

$$q_{\omega_1} = \frac{I_1}{\delta}, \text{ мм}^2; \quad q_{\omega_2} = \frac{I_2 - I_1}{\delta}, \text{ мм}^2;$$

для повышающего автотрансформатора (рис. 2.20.2):

$$q_{\omega_1} = \frac{I_2 - I_1}{\delta}, \text{ мм}^2; \quad q_{\omega_2} = \frac{I_2}{\delta}, \text{ мм}^2.$$

Далее расчет автотрансформатора проводится так же, как и расчет обычного трансформатора.

**Пример 2.20.1.** Рассчитать повышающий автотрансформатор, если  $U_1 = 127 \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $U_2 = 220 \text{ В}$ ,  $S_2 = 220 \text{ ВА}$ .

## Решение

1. Расчетная мощность:

$$S_{2t} = S_2(1 - n) = 220(1 - 0,576) = 93,1 \text{ ВА},$$

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{127}{220} = 0,576.$$

2. Определяем токи первичной и вторичной обмоток:

$$I_1 = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1} = \frac{220 \cdot 1}{127 \cdot 0,95 \cdot 0,9} = 2,02 \text{ А},$$

$$\eta = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{S_2 \cos \varphi_1 + K^1 S_{2t}} = \frac{220 \cdot 1}{220 + 0,125 \cdot 93,1} = 0,95.$$

Коэффициент  $K^1$  (рис. 2.20.3) равен 0,125,  $\cos \varphi_1 = 0,9$ ,  $\cos \varphi_2 = 1$ ,

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{220}{220} = 1 \text{ А}.$$

3. Сечение стержня:

$$Q_c = 3 \sqrt{\frac{S_{2t}}{\delta}} = 3 \sqrt{\frac{93,1}{3}} = 16,7 \text{ см}^2.$$

Принимаем  $Q_c = 3 \cdot 6 = 18 \text{ см}^2$ .

4. Сечение первичной и вторичной обмотки:

$$q_{\omega_1} = \frac{I_1 - I_2}{\delta} = \frac{2,02 - 1}{3} \text{ мм}^2;$$

$$q_{\omega_2} = \frac{I_2}{\delta} = \frac{1}{3} \text{ мм}^2.$$

Принимаем провод для обеих обмоток  $q_{\omega_1} = q_{\omega_2} = 0,3525 \text{ мм}^2$ .

5. Количество витков отдельных секций обмотки:

$$\omega_1 = 55 \frac{U_1}{Q_c} = 55 \frac{127}{18} = 390;$$

$$\omega_2 = \frac{U_2 - U_1}{U_2} \omega_1 = \frac{220 - 127}{220} \cdot 390 = 165.$$

### 2.21. Упрощенный расчет трехфазного трансформатора мощностью до 10 кВА

Для расчета должны быть заданы: напряжение сети  $U_1$ , напряжение вторичной обмотки  $U_2$ , частота сети  $f$  (Гц), полная мощность трансформатора  $S$  кВА, характер нагрузки.

Расчет трехфазного трансформатора небольшой мощности производим по той же методике, что и расчет обычных однофазных трансформаторов. Различие заключается в способе определения токов в обмотках и напряжений на зажимах. Зная полную мощность трансформатора, определяем сечение стального сердечника:

$$Q_c = 0,47 \sqrt{\frac{S \cdot 10^5}{B_c \cdot f}} \text{ см}^2;$$

где  $B_c$  – магнитная индукция в сердечнике, Т;

$S$  – полная мощность трансформатора, кВА.

Сечение ярма должно быть на 10 % больше сечения стержня. Плотность тока можно принимать равной от 1,8 до 4 А/мм<sup>2</sup>. Меньшую плотность принимают для внутренних установок, а большую – для наружных установок.

**Пример 2.21.1.** Рассчитать трехфазный понижающий трансформатор мощностью 5 кВА, напряжением 6000 В на 380/220 В, частотой 50 Гц.

### Решение

1. Сечение сердечника:

$$Q_c = 0,47 \sqrt{\frac{S \cdot 10^5}{B_c \cdot f}} = 0,47 \sqrt{\frac{5 \cdot 10^5}{1 \cdot 50}} = 47 \text{ см}^2.$$

2.  $B_c = 1$  Т (сталь Э41).

Ширина пластин стержня  $a = 5$  см, толщина  $b = 10$  см. Фактическое сечение стержня:

$$Q_{c\phi} = a \cdot b = 5 \cdot 10 = 50 \text{ см}^2.$$

3. Количество витков первичной и вторичной обмоток на фазу:

$$\omega_1 = \frac{U_{1\phi} \cdot 10^4}{222 B_c Q_{c\phi}} = \frac{3470 \cdot 10^4}{222 \cdot 1 \cdot 50} = 3130;$$

$$\omega_2 = \frac{U_{2\phi} \cdot 10^4}{222 B_c Q_{c\phi}} = \frac{220 \cdot 10^4}{222 \cdot 1 \cdot 50} = 198.$$

Приняв соединение обмоток по схеме звезда – звезда, получим:

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1\Delta}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3470 \text{ В},$$

$$U_{2\phi} = \frac{U_{2\Delta}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220.$$

4. Сечение провода первичной и вторичной обмоток:

$$q_1 = \frac{I_1}{\delta} = \frac{0,48}{2} = 0,24 \text{ мм}^2;$$

$$q_2 = \frac{I_2}{\delta} = \frac{7,6}{2} = 3,8 \text{ мм}^2;$$

$$I_1 = \frac{5 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 0,48 \text{ А}; \quad I_2 = \frac{5 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 7,6 \text{ А}.$$

Плотность тока принимаем равной 2 А/мм<sup>2</sup>. Выбираем стандартное сечение проводов ПЭВ-I для первичной обмотки:

$$q_{r1} = 0,238 \text{ мм}^2 \quad (d_{r1} = 0,55 \text{ мм});$$

для вторичной обмотки:

$$q_{r2} = 4,01 \text{ мм}^2 \quad (d_{r2} = 2,26 \text{ мм}).$$

## 2.22. Допустимые мощности двигателей при прямом пуске от силовых трансформаторов

Максимальная потеря напряжения на зажимах двигателя при пуске его от трансформатора, работающего вхолостую:

$$\Delta U\% = \frac{Z_T}{Z_T + Z_D} \cdot 100,$$

где  $Z_T + Z_D$  – соответственно полное сопротивление фазы трансформатора и двигателя при коротком замыкании, Ом.

$$Z_T = \frac{U_K\%}{100} \cdot \frac{U_H}{I_H}, \text{ Ом};$$

$$Z_D = \frac{U_H}{K_p I_H}, \text{ Ом},$$

где  $U_H, I_H$  – номинальные (фазные) напряжения (В) и ток трансформатора (А);  
 $K_p$  – кратность пускового тока (по каталогу).

Если выразить полное сопротивление при КЗ через мощности КЗ трансформатора и двигателя, то потеря напряжения на зажимах двигателя, при пуске:

$$\Delta U\% = \frac{S_{дк}}{S_{дк} + S_{тк}} \cdot 100,$$

где  $S_{дк}, S_{тк}$  – соответственно мощность КЗ двигателя и трансформатора, кВА:

$$S_{дк} = \frac{K_p P_{2H}}{\eta \cdot \cos \varphi}, \text{ кВА};$$

$$S_{тк} = \frac{100 S_T}{U_K\%}, \text{ кВА}.$$

$P_{2H}$  – номинальная мощность на валу двигателя, кВт,  
 $\eta, \cos \varphi$  – КПД и коэффициент мощности двигателя при номинальной нагрузке (по каталогу);

$S_T$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$U_K\%$  – напряжение КЗ трансформатора, %.

При включении электродвигателя от силового трансформатора, работающего с нагрузкой  $S_H$  (кВА):

$$\Delta U\% = \frac{S_{дк} + S_H}{S_{дк} + S_{тк} + S_H} \cdot 100.$$

**Пример 2.22.1.** Мощность электродвигателя  $P_{2H} = 10$  кВт, мощность трансформатора  $S_T = 20$  кВА,  $S_{дк} = 65$  кВА,  $S_{тк} = 360$  кВА. Определить  $\Delta U$  %.

### Решение

$$\Delta U \% = \frac{S_{\text{дк}}}{S_{\text{дк}} + S_{\text{тк}}} \cdot 100 = \frac{65}{65 + 360} \cdot 100 = 15,3 \%$$

**Пример 2.22.2.** На артезианской скважине работает АД с КЗ ротором, 380 В, 22 кВт, 28 кВА, пусковая мощность 170 кВА. Двигатель питается от трансформатора 6/0,4 кВ, 40 кВА,  $U_{\text{к}} = 5,5 \%$ . Определить  $\Delta U \%$  и кратность тока в трансформаторе при пуске АД.

### Решение

1. Сопротивление двигателя при пуске, приведенное к напряжению и мощности трансформатора:

$$X_{\text{д}} = \frac{S_{\text{т}}}{S_{\text{дк}}} \cdot \left( \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{с}}} \right)^2 = \frac{40}{170} \cdot \left( \frac{380}{400} \right)^2 = 0,212.$$

2. Общее сопротивление трансформатора и пускаемого двигателя:

$$X_{\Sigma} = X_{\text{т}} + X_{\text{д}} = \frac{U_{\text{к}} \%}{100 \%} + X_{\text{д}} = 0,055 + 0,212 = 0,267.$$

3. Начальное напряжение на шинах и выводах двигателя при пуске:

$$U = \frac{U_0 X_{\text{д}}}{X_{\text{т}} + X_{\text{д}}} = \frac{1,03 \cdot 0,212}{0,267} = 0,82;$$

$$\Delta U \% = (1 - 0,82) \cdot 100 = 18 \%$$

4. Кратность тока в трансформаторе при прямом пуске двигателя:

$$j_{\text{т}} \approx \frac{U_0}{X_{\Sigma}} \approx \frac{1,03}{0,267} = 3,86,$$

что при кратковременных редких пусках допустимо.

## 2.23. Выбор предохранителей ПК силовых трансформаторов (6–10 кВ)

Номинальный ток в первичной обмотке:

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} U_1 \eta},$$

где  $S$  – мощность трансформатора, кВА;

$U_1$  – напряжение, кВ;

$\eta$  – КПД при полной нагрузке и  $\cos \varphi = 1$ .

Номинальный предельный ток плавкой вставки:

$$I_{\text{н.пр.1}} \geq (1,5 \div 3) I_{\text{н}}.$$

Номинальные токи плавкой вставки в зависимости от мощности трансформатора приведены в табл. 2.23.1.

Таблица 2.23.1

## Номинальные токи плавкой вставки

| Ст кВА,                   | 25  | 40  | 63  | 100 | 160 | 250 | 400 | 630 | 1000 |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $I_{HT}, I_{H.ПЛ.ВСТ}, A$ |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| $I_{HT} (6 кВ)$           | 2,5 | 4   | 6,3 | 10  | 16  | 25  | 40  | 63  | 100  |
| $I_{H.ПЛ.ВСТ}$            | 7,5 | 10  | 15  | 20  | 30  | 40  | 75  | 100 | 150  |
| $I_{HT} (10кВ)$           | 1,5 | 2,4 | 3,7 | 6   | 9,5 | 15  | 24  | 37  | 57   |
| $I_{H.ПЛ.ВСТ}$            | 3   | 5   | 7,5 | 10  | 20  | 30  | 50  | 75  | 120  |

## 2.24. Технические данные трансформаторов

Таблица 2.24.1

Трансформаторы силовые трехфазные сухие защищенные общего назначения от 160 до 1600 кВА, от 6 до 15,75 кВ (ГОСТ 14074)

| Типоразмер                           | $U_k, \%$<br>$U_H$ | Потери, кВт |      | $I_0, \%$ | Масса,<br>т | Габариты, м |       |        |
|--------------------------------------|--------------------|-------------|------|-----------|-------------|-------------|-------|--------|
|                                      |                    | ХХ          | КЗ   |           |             | Высота      | Длина | Ширина |
| 1                                    | 2                  | 3           | 4    | 5         | 6           | 7           | 8     | 9      |
| ТС3–160/10                           | 5,5                | 0,7         | 2,7  | 4         | 1,4         | 1,7         | 1,8   | 0,95   |
| ТС3–250/10                           | 5,5                | 1           | 3,8  | 3,5       | 1,8         | 1,85        | 1,85  | 1      |
| ТС3–400/10                           | 5,5                | 1,3         | 5,4  | 3         | 2,4         | 2,15        | 2,25  | 1      |
| ТС3–630/10                           | 5,5                | 2           | 7,3  | 1,5       | 3,4         | 2,3         | 2,25  | 1,1    |
| ТС3–1000/10                          | 5,5                | 3           | 11,2 | 1,5       | 4,6         | 2,55        | 2,4   | 1,35   |
| ТС3–1600/10                          | 5,5                | 4,2         | 16   | 1,5       | 6,5         | 3,2         | 2,65  | 1,35   |
| ТС3–250/15                           | 8                  | 1,1         | 4,4  | 4         | 2,2         | 1,85        | 2,3   | 1,2    |
| ТС3–400/15                           | 8                  | 1,4         | 6    | 3,5       | 2,7         | 2,15        | 2,45  | 1,2    |
| ТС3–630/15                           | 8                  | 2,3         | 8,7  | 2         | 4           | 2,35        | 2,45  | 1,35   |
| ТС3–1000/15                          | 8                  | 3,2         | 12   | 2         | 5           | 2,75        | 2,55  | 1,35   |
| ТС3–1600/15                          | 8                  | 4,3         | 16   | 2         | 6,8         | 3,2         | 2,6   | 1,35   |
| Трансформаторы для СН электростанций |                    |             |      |           |             |             |       |        |
| ТС3–630/10                           | 8                  | 2           | 8,5  | 2         | 3,8         | 2,3         | 2,25  | 1,1    |
| ТС3С–1000/10                         | 8                  | 3           | 12   | 2         | 5,6         | 2,55        | 2,4   | 1,35   |

*Примечания:*

1. Трансформаторы в пределах класса 10 кВ могут иметь  $U_{H1} = 6; 6,3; 10$  и  $10,5$  кВ, кроме  $S_H = 250; 1000$  и  $1600$  кВА, у которых ВН – 6 или 10 кВ;  $U_H =$  НН 0,23; 0,4 и 0,69 кВ для  $S_H = 160–400$  кВА и 0,4 и 0,69 для остальных. Для класса 15 кВ ВН 13,8 и 15,75 кВ и НН 0,4 кВ. Трансформаторы ТС3С имеют ВН 6; 6,3; 10 и 10,5 кВ и НН 0,4 кВ.

Все трансформаторы имеют ПБВ  $\pm (2 \times 2,5) \%$ .

2. Срок службы до списания 25 лет.

ГОСТ 16555 распространяется на стационарные двухобмоточные понижающие трансформаторы с переключением ответвлений без возбуждения (ПБВ) на стороне ВН  $\pm (2 \times 2,5 \%)$ , климатических исполнений У и УЛ, категорий размещения 1 и 3. Для ТНЗ полная масса указана при заполнении совтолом 10 (табл. 2.24.2).

Таблица 2.24.2

Трансформаторы силовые трехфазные герметичные  
 масляные и с негорючим жидким диэлектриком  
 мощностью 250–2500 кВА и до 10 кВ для КТП (ГОСТ 16555)

| Тип     | $S_{\text{ном}}$ ,<br>кВА | $U_{\text{ном}}$ , кВ |           | $U_{\text{к}}$ ,<br>% $U_{\text{н}}$ | $I_0$ ,<br>% $I_{\text{н}}$ | Потери,<br>кВт |      | Габариты, м,<br>не более |       |        | Полная<br>масса,<br>т, не более |
|---------|---------------------------|-----------------------|-----------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------|------|--------------------------|-------|--------|---------------------------------|
|         |                           | ВН                    | НН        |                                      |                             | XX             | КЗ   | высота                   | длина | ширина |                                 |
| ТМЗ/ТНЗ | 250                       | 6; 10                 | 0,4       | 4,5                                  | 2,3                         | 0,8            | 3,7  | 1,75                     | 1,8   | 1,4    | 1,7/2                           |
| ТМЗ/ТНЗ | 400                       | 6; 10                 | 0,4       | 4,5                                  | 2,1                         | 1,0            | 5,5  | 1,86                     | 2     | 1,4    | 2,1/2,6                         |
| ТМЗ/ТНЗ | 630                       | 6; 10                 | 0,4       | 5,5                                  | 1,8                         | 1,7            | 7,6  | 2                        | 2,19  | 1,4    | 2,9/3,4                         |
| ТМЗ/ТНЗ | 1000                      | 6; 10                 | 0,4; 0,69 | 5,5                                  | 1,4                         | 2,4            | 11   | 2,3                      | 2,32  | 1,5    | 4,3/5,1                         |
| ТМЗ/ТНЗ | 1600                      | 6; 10                 | 0,4; 0,69 | 5,5                                  | 1,2                         | 3,3            | 16,5 | 2,7                      | 2,56  | 1,6    | 6,5/8                           |
| ТМЗ/ТНЗ | 2500                      | 6;10                  | 0,4; 0,69 | 5,5                                  | 1                           | 4,6            | 24   | 2,9                      | 2,9   | 1,8    | 10/12                           |

## 2.25. Неисправности трансформаторов

Таблица 2.25.1

Неисправности трансформаторов и их основные причины

| № п/п | Неисправность  | Причина  |
|-------|--|--|
| 1     | Перегрев трансформатора  | а) трансформатор перегружен;<br>б) слишком высокая температура трансформаторного помещения;<br>в) слишком низок уровень масла в трансформаторе;<br>г) внутренние повреждения: замыкания между витками, фазами, образование коротко-замкнутых контуров из-за повреждения изоляции стягивающих болтов.   |
| 2     | Пробой обмоток на корпус между обмотками высшего и низшего напряжений или между фазами | а) возникли перенапряжения связанные с грозовыми явлениями или коммутационными процессами;<br>б) резко ухудшилось качество масла (увлажнение, загрязнение и пр.);<br>в) понизился уровень масла;<br>г) изоляция подверглась естественному износу (старение);<br>д) при внешних коротких замыканиях, а также при замыканиях внутри трансформатора, возникли электродинамические усилия. |
| 3     | Обрывы в обмотках  | а) плохо выполнена пайка обмотки;<br>б) повреждения в проводах, соединяющих концы обмотки с выводами;<br>в) при коротких замыканиях как внутри, так и вне трансформатора развиваются электродинамические усилия.   |

Окончание табл. 2.25.1

| № п/п | Неисправность   | Причина   |
|-------|---|---|
| 4     | Газовая защита сработала на сигнал (у силовых трансформаторов $S_1 \geq 1000$ кВА устанавливается газовая защита) | а) внутренние повреждения трансформатора привели к слабому газообразованию;<br>б) при заливке или очистке масла в трансформатор попал воздух;<br>в) медленно понижается уровень масла из-за снижения температуры или вследствие течи масла из бака.   |
| 5     | Газовая защита сработала на сигнал и на отключение или только на отключение                                       | Внутренние повреждения и другие причины, сопровождаемые сильным газообразованием  |
| 6     | Первичные напряжения одинаковы, вторичные одинаковы при ХХ, но различны при нагрузке                              | а) плохой контакт в соединении одного из зажимов или внутри обмотки одной из фаз;<br>б) обрыв в первичной обмотке трансформатора стержневого типа соединённого по схеме $\Delta/\Upsilon$ или $\Delta/\Delta$ .   |
| 7     | Первичные напряжения одинаковы, вторичные не одинаковы при ХХ и при нагрузке                                      | а) вывернута обмотка (перепутаны начало и конец обмотки) одной из фаз вторичной обмотки при соединении звездой;<br>б) обрыв в первичной обмотке трансформатора, соединённого по схеме $\Upsilon/\Upsilon$ ;<br>в) обрыв во вторичной обмотке трансформатора при соединении его по схеме $\Upsilon/\Upsilon$ или $\Delta/\Upsilon$ . |

## Глава 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

### 3.1. Общие сведения по электрическим машинам

#### 3.1.1. Номинальные режимы электрических машин

По ГОСТ 183 имеем восемь номинальных режимов работы электрических машин. Из них рассмотрим три основных режима.

**Продолжительный.** Условное обозначение  $S_1$ . Характеризуется продолжительностью работы машины, достаточной для достижения практически установившейся температуры всех частей машины, при неизменной внешней нагрузке.

**Кратковременный** с длительностью периода неизменной номинальной нагрузки 10, 30, 60 и 90 мин. Условное обозначение режима  $S_2$ . Характеризуется определенной продолжительностью работы машины при неизменной внешней нагрузке, недостаточной для достижения практически установившейся температуры машины, после чего следует электрическое отключение, продолжительность которого достаточна для охлаждения машины до холодного состояния.

**Повторно-кратковременный** с продолжительностью включения (ПВ) 15, 25, 40 и 60 %. Продолжительность одного цикла принимается 10 мин; условное обозначение режима  $S_3$ . Относительная (в процентах) продолжительность включения ПВ определяется по формуле:

$$ПВ = \frac{N}{N+R} \cdot 100,$$

где  $N$  – время работы,  $R$  – пауза.

Пусковые потери в этом режиме практически не оказывают влияния на превышение температуры отдельных частей машины.

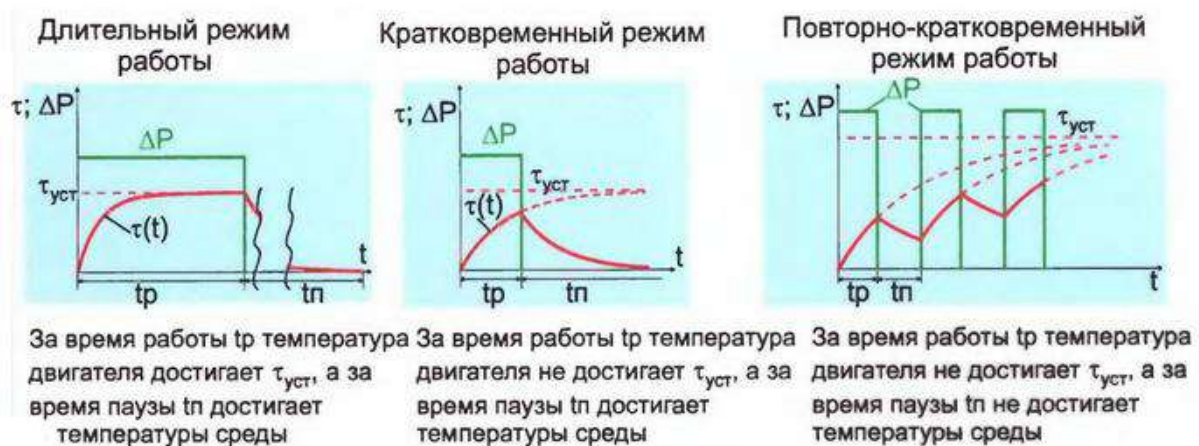


Рис. 3.1.1. Режимы работы электродвигателей

### 3.2. Основные параметры электрических машин

Номинальной нагрузкой называется такая нагрузка, при которой машина развивает номинальную мощность.

#### **Номинальная мощность электрической машины:**

– полезная электрическая, мощность на выводах машины, выраженная в ваттах (Вт), киловаттах (кВт) или мегаваттах (МВт), – для генераторов постоянного тока;

– полная электрическая мощность при номинальном коэффициенте мощности, выраженная в вольтамперах (ВА), киловольтамперах (кВА) или мегавольтамперах (МВА) – для генераторов переменного тока;

– реактивная мощность при опережающем токе на выводах машины, выраженная в варах (Var), киловарах (кВАр) или мегаварах (МВАр) – для синхронных и асинхронных компенсаторов;

– полезная механическая мощность на валу (Вт, кВт, МВт) – для электродвигателей.

Номинальные мощности для всех видов разрабатываемых электрических машин постоянного и переменного тока независимо от областей их применения установлены ГОСТ 12139, кВт:

0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000.

**Расчетной рабочей температурой** называется температура, к которой приводятся сопротивления обмоток электрической машины при подсчете потерь в ней. Она принимается равной 75 °С для обмоток, предельные допустимые превышения температуры которых соответствуют классам нагревостойкости А, Е, В и 115 °С для классов нагревостойкости F, H.

Двигатели должны сохранять номинальную мощность, при отклонениях напряжения сети от номинального в пределах (-5 ÷ +10 %).

Электрические машины должны без повреждений и остаточных деформаций выдерживать следующие перегрузки по току:

– машины постоянного тока и коллекторные машины переменного тока – на 50 % номинального в течение 1 мин;

– бесколлекторные машины переменного тока мощностью 0,55 кВт и выше, кроме машин с непосредственным охлаждением обмоток – на 50 % в течение 2 мин.

Все электрические машины должны выдерживать в течение 2 мин следующее повышение частоты вращения:

– двигатели последовательного возбуждения постоянного и переменного тока – на 20 % сверх наибольшей, указанной на табличке, но не менее чем на 50 % номинальной;

– двигатели с регулировкой частоты вращения – на 20 % сверх наибольшей, указанной на табличке.

Направление вращения электрической машины должно быть правым, если нет других указаний в стандартах или технических условиях.

Номинальный коэффициент мощности синхронных машин при частоте 50 Гц:

- синхронных генераторов – 0,8 (при отстающем токе);
- синхронных электродвигателей – 0,9 (при опережающем токе).

Электрические машины имеют номинальные значения высот оси вращения (ГОСТ 13267): 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000 мм.

### 3.3. Сопротивление изоляции обмоток

Сопротивление изоляции обмоток электрической машины ( $r$  в МОм) относительно ее корпуса и между обмотками при рабочей температуре машины должно быть не менее значения, получаемого по формуле (но не менее 0,5 МОм):

$$r = \frac{U_H}{1000 + P_H/100},$$

где  $U_H$  – номинальное напряжение обмотки машины, В;

$P_H$  – номинальная мощность машины, кВА, а для машин постоянного тока – кВт.

### 3.4. Потери мощности и КПД электрических машин

Различают следующие виды потерь мощности в электрических машинах:

- а) потери в стали, или магнитные потери  $P_m$ ;
- б) механические потери  $P_T$ ;
- в) основные потери в цепях рабочих обмоток машины  $P_\Sigma$ ;
- г) потери в переходных контактах щеток  $P_{щ}$ ;
- д) потери на возбуждение  $P_f, P_B$ ;
- е) добавочные потери  $P_d$ .

Коэффициент полезного действия (КПД) электрической машины равен отношению полезной (отдаваемой) активной мощности к подводимой активной мощности  $P_1$ :

$$\eta = P_2/P_1.$$

При определении КПД по экспериментальным данным в связи с возможностью точного измерения электрической мощности используются формулы:

для генераторов:

$$\eta = 1 - \Sigma P / (P_2 + \Sigma P),$$

для двигателей:

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1},$$

где  $P_2$  – полезная мощность, отдаваемая генератором;

$P_1$  – мощность, подводимая к двигателю;

$\Sigma P$  – сумма потерь в машине.

### 3.5. Обозначение выводов обмоток (ГОСТ 183)

Вывода обмоток электрических машин обозначаются в соответствии с табл. 3.5.1.

Таблица 3.5.1

Обозначения выводов обмоток

| Наименование, схема соединения обмоток                        | Обозначения выводов |       |
|---|---------------------|-------|
|   | Начало              | Конец |
| 1. Обмотки машин постоянного тока                             |                     |       |
| Обмотка якоря   | Я1                  | Я2    |
| Компенсационная обмотка                                       | К1                  | К2    |
| Обмотка добавочных полюсов                                    | Д1                  | Д2    |
| Последовательная обмотка возбуждения                          | С1                  | С2    |
| Параллельная обмотка возбуждения                              | Ш1                  | Ш2    |
| Пусковая обмотка  | П1                  | П2    |
| Уравнительный провод и уравнительная обмотка                  | У1                  | У2    |
| Обмотка особого назначения                                    | 01                  | 02    |
| Независимая обмотка возбуждения                               | Н1                  | Н2    |
| 2. Обмотки машин переменного тока                             |                     |       |
| А. Обмотки возбуждения (индукторов) синхронных машин          |                     |       |
| И1  | И2                  |       |
| Б. Обмотки статора (якоря)                                    |                     |       |
| Открытая схема  |                     |       |
| Первая фаза   | С1                  | С4    |
| Вторая фаза   | С2                  | С5    |
| Третья фаза   | С3                  | С6    |
| Соединение звездой  |                     |       |
| Первая фаза   | С1                  |       |
| Вторая фаза   | С2                  |       |
| Третья фаза   | С3                  |       |
| Нулевая точка   | 0                   |       |
| Соединение треугольником                                      |                     |       |
| Первый вывод  | С1                  |       |
| Второй вывод  | С2                  |       |
| Третий вывод  | С3                  |       |
| В. Обмотки ротора 3-фазных асинхронных двигателей (АД)        |                     |       |
| Первая фаза   | Р1                  |       |
| Вторая фаза   | Р2                  |       |
| Третья фаза   | Р3                  |       |
| Нулевая фаза  | 0                   |       |
| Г. Обмотки, статора (якоря) однофазных асинхронных двигателей |                     |       |
| Главная обмотка   | С1                  | С2    |
| Вспомогательная обмотка                                       | В1                  | В2    |

### 3.6. Номинальные частоты вращения электрических машин (ГОСТ 10683)

Номинальные частоты вращения машин постоянного тока (до 60000 об/мин):

генераторов: 400, 500, 600, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10000, 12000, 15000;

электродвигателей: 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 1000, 1500, 2000, 2200, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10000, 12000, 15000, 18000, 20000, 22000, 30000, 40000, 60000.

Номинальные частоты вращения электрических машин переменного тока при частотах тока, предусмотренных ГОСТ 6697 в диапазоне от 50 до 1000 Гц:

синхронные электродвигатели:

$f = 50$  Гц,  $n = 100; 125; 150; 166,6; 187,5; 214,3; 250; 300; 375; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000$  (об/мин);

$f = 100$  Гц,  $n = 3000; 6000$  (об/мин);

$f = 200$  Гц,  $n = 4000; 6000; 12000$  (об/мин);

$f = 400$  Гц,  $n = 1500; 3000; 4000; 6000; 8000; 12000$  (об/мин);

$f = 1000$  Гц,  $n = 1500; 3000; 4000; 6000; 10000; 12000; 15000$  (об/мин);

синхронные генераторы:

$f = 50$  Гц,  $n = 125; 150; 187,5; 214,3; 250; 300; 375; 428,6; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000$  (об/мин);

$f = 100$  Гц,  $n = 1000; 1500; 3000; 6000$  (об/мин);

$f = 200$  Гц,  $n = 1500; 3000; 8000; 12000$  (об/мин);

$f = 400$  Гц,  $n = 1500; 3000; 6000; 8000; 12000$  (об/мин);

$f = 1000$  Гц,  $n = 1500; 3000; 6000; 12000$  (об/мин);

асинхронные электродвигатели:

$f = 50$  Гц,  $n = 100; 125; 150; 166,6; 187,5; 250; 300; 375; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000$  (об/мин);

$f = 100$  Гц,  $n = 3000; 6000$  (об/мин);

$f = 200$  Гц,  $n = 1500; 3000; 4000; 6000; 8000; 12000$  (об/мин);

$f = 400$  Гц,  $n = 1500; 3000; 4000; 6000; 8000; 12000$  (об/мин);

$f = 1000$  Гц,  $n = 3000; 4000; 6000; 10000; 12000; 15000$  (об/мин).

*Примечание.* Номинальные частоты вращения асинхронных двигателей могут быть меньше указанных на частоту вращения, определяемую величиной номинального скольжения.

Номинальные частоты вращения универсальных коллекторных двигателей, об/мин: 1000; 1500; 2000; 3000; 5000; 8000; 10000; 12000; 15000; 18000; 22000.

Максимальные значения номинального скольжения для асинхронных трехфазных электродвигателей различной мощности указаны в табл. 3.6.1.

Максимальные значения номинального скольжения

|                    |         |         |        |     |
|--------------------|---------|---------|--------|-----|
| Мощность, кВт      | 0,1–0,6 | 0,6–2,2 | 2,2–10 | >10 |
| Ном. скольжение, % | 10      | 7       | 5,5    | 3,5 |

### 3.7. Классификация электрических машин

#### А. По величине

Электрические машины принято разделять по мощности:

|                |               |
|----------------|---------------|
| микромашины    | до 0,5 кВт;   |
| малые машины   | 0,51–25 кВт;  |
| средние машины | 25,1–100 кВт; |
| большие машины | > 100 кВт;    |

#### Б. По степени защиты

По степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и движущимися частями, находящимися внутри машины, и попадания посторонних тел внутрь машины, а также по степени защиты от проникновения воды согласно ГОСТ 17494 на машины электрические до 1000 В имеются следующие исполнения машин:

- 1) открытая электрическая (IP00);
- 2) защищенная от прикосновения и попадания посторонних предметов (IP10, IP20);
- 3) защищенная от капель воды (IP01), от капель воды и от прикосновения и попадания посторонних предметов (IP11, IP21, IP12, IP22, IP13, IP23, IP43);
- 4) защищенная от брызг, прикосновения и попадания посторонних предметов (IP44, IP54);
- 5) защищенная от водяных струй, прикосновения, попадания посторонних предметов и вредных отложений пыли (IP55);
- 6) защищенная от захлестывания морской волной на палубе корабля, прикосновения, попадания посторонних предметов и вредных отложений пыли (IP56);
- 7) защищенная от проникновения воды внутрь при кратковременном погружении в воду (IP57);
- 8) защищенная от прикосновения воды внутрь при неограниченно длительном погружении в воду (IP58).

#### В. В зависимости от среды

- 1) взрывозащищенная (при взрыве газов внутри машины возникающее пламя не может проникнуть в окружающую среду);
- 2) влагостойкая для работы при большой влажности;
- 3) морозостойкая для работы при возможном образовании инея;
- 4) химостойкая для работы при воздействии химических реагентов;
- 5) тропическая для работы при возможном образовании плесневых грибов.

### Г. По способу охлаждения

1) с естественным охлаждением, не имеющие специальных вентиляторов (применяется обычно в открытых машинах);

2) с искусственным охлаждением за счет вытяжной или нагнетательной вентиляции;

3) обдуваемые (закрытые), в которых осуществляется принудительное охлаждение только наружной поверхности машины;

4) продуваемые – защищенные или закрытые, в которые воздух попадает извне, омывает нагретые поверхности активных частей (обмоток и магнитопровода) и затем выбрасывается наружу.

### Д. По конструктивному исполнению и способу монтажа

Условное обозначение состоит из буквенной части IM и следующих за ней четырех цифр.

**Первая цифра** является номером группы, в которую входит машина по конструктивному исполнению.

**Вторая и третья цифры** – деление на группы представлено в табл. 3.7.1. В каждой из девяти групп машины подразделяются в зависимости от способа монтажа.

**Четвертая цифра** обозначает количество и исполнение концов вала.

Пример условного обозначения электрической машины с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, с горизонтальным валом и одним цилиндрическим концом вала: IM100.

Таблица 3.7.1

Группа конструктивных исполнений электрических машин

| Условное обозначение группы | Конструктивное исполнение машин  |
|-----------------------------|--|
| IM1                         | Машины на лапах с подшипниковыми щитами  |
| IM2                         | Машины на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах) |
| IM3                         | Машины без лап с подшипниковыми щитами с фланцем на одном подшипниковом щите         |
| IM4                         | Машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине                         |
| IM5                         | Машины без подшипников   |
| IM6                         | Машины с подшипниковыми щитами и стоячковыми подшипниками                            |
| IM7                         | Машины со стоячковыми подшипниками (без подшипниковых щитов)                         |
| IM8                         | Машины с вертикальным валом, не охватываемые группами от IM1 до IM4                  |
| IM9                         | Машины специального исполнения по способу монтажа                                    |

### 3.8. Воздушные зазоры электрических машин

#### 3.8.1. Воздушные зазоры асинхронных машин

Величина воздушного зазора влияет на ток холостого хода  $I_0$  и, следовательно, на коэффициент мощности и КПД, а также на величину добавочных потерь в стали и величину индуктивного сопротивления.

Увеличение зазора на 1 % уменьшает на 0,83 % коэффициент мощности и увеличивает на 0,66 % ток  $I_0$ .

Воздушные зазоры асинхронных машин приведены в табл. 3.8.1, синхронных машин – в табл. 3.8.2, машин постоянного тока – в табл. 3.8.3.

Таблица 3.8.1

Воздушные зазоры асинхронных машин

| $P_{2H}$ , кВт | 500–1500 об/мин |                    | 3600 об/мин     |                    |
|----------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
|                | $\delta_H$ , мм | $\delta_{ув}$ , мм | $\delta_H$ , мм | $\delta_{ув}$ , мм |
| 0,12–0,25      | 0,2             | 0,3                | 0,25            | 0,4                |
| 0,5–0,75       | 0,25            | 0,4                | 0,3             | 0,5                |
| 1,0–2,0        | 0,3             | 0,5                | 0,35            | 0,5                |
| 2,0–7,5        | 0,35            | 0,55               | 0,5             | 0,8                |
| 10–15          | 0,4             | 0,65               | 0,65            | 1,0                |
| 20–40          | 0,5             | 0,8                | 0,8             | 1,25               |
| 50–75          | 0,65            | 1,0                | 1,0             | 1,5                |
| 100–180        | 0,8             | 1,25               | 1,25            | 1,75               |
| 200–250        | 1,0             | 1,5                | 1,5             | 2,0                |

*Примечания:* 1. Зазоры измеряют щупами с обеих сторон ротора в различных точках и при четырех сдвинутых на  $90^\circ$  положениях ротора в холодном и горячем состоянии.

2.  $\delta_H$  – нормальный зазор,  $\delta_{ув}$  – увеличенный зазор.

#### 3.8.2. Воздушные зазоры синхронных машин

Таблица 3.8.2

Воздушные зазоры для синхронных машин

| Мощность, кВт | Скорость вращения об/мин | Воздушный зазор, мм |
|---------------|--------------------------|---------------------|
| 200–400       | 125–187                  | 2,5–3               |
| 300           | 375                      | 10                  |
| 2800          | 750                      | 13,5                |

#### 3.8.3. Воздушные зазоры машин постоянного тока

Таблица 3.8.3

Воздушные зазоры для машин постоянного тока

| Мощность, кВт | Воздушный зазор, мм |
|---------------|---------------------|
| До 50         | 1,5–3               |
| 50–200        | 3–5                 |
| Более 200     | 5–10                |

*Примечание.* Зазоры измеряют против середины полюсных башмаков под каждым полюсом.

### 3.9. Фазирование электрических машин

Для получения требуемого направления вращения электрических машин необходимо знать порядок чередования фаз.

#### А. Двигатели постоянного тока

При отсутствии маркировки направление вращения двигателя до включения его в сеть можно определить опытным способом. Для этого к зажимам якоря подключают вольтметр магнитоэлектрической системы со шкалой 3–7 В. Поворачивая якорь (по часовой стрелке или против), замечают наибольшую величину отклонения стрелки прибора. Затем в обмотку возбуждения ОВ подают напряжение 2–4 В такой полярности, при которой отклонение стрелки вольтметра возрастает (рис. 3.9.1).

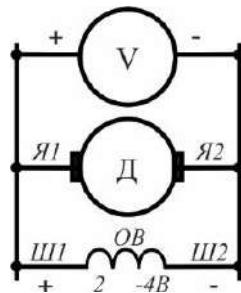


Рис. 3.9.1. Определение направления вращения двигателя постоянного тока

Отмечают полярность батареи, присоединенной к зажимам ОВ, и полярность присоединения вольтметра к зажимам якоря. При присоединении к сети соблюдают ту же полярность. Направление вращения двигателя будет соответствовать направлению вращения при опыте.

Например, если вольтметр магнитоэлектрической системы был подсоединен зажимом «+» к зажиму Я1, а якорь вращали по часовой стрелке и увеличение отклонения стрелки происходило при подключении зажима «+» сети к зажимам Я1 и Ш1, то двигатель будет вращаться по часовой стрелке.

#### Б. Машины переменного тока

Для получения требуемого направления вращения электрических машин без пробного пуска разработан простой способ фазирования с использованием трансформаторной ЭДС от потока реакции якоря [50].

С выводом обмотки, принимаемым за фазу А, соединяется «+» источника постоянного тока, а «-» к любому из оставшихся выводов, сюда же подключается вольтметр. Плюс (+) вольтметра присоединяется к оставшемуся свободным выводу обмотки (рис. 3.9.2).

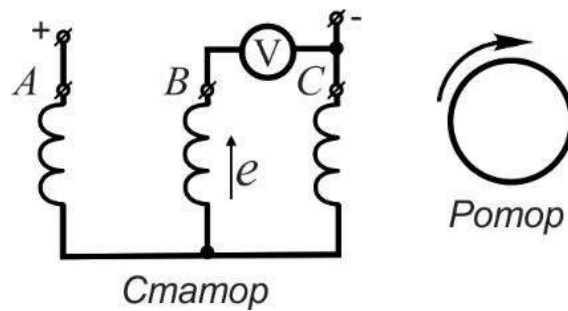


Рис. 3.9.2. Определение направления вращения трехфазного двигателя переменного тока

После этого ротор машины толчком поворачивается в заданном направлении. Если в начальный момент поворота ротора показание вольтметра увеличивается, то свободный вывод обмотки маркируется фазой В, а если уменьшается – фазой С. Затем маркируется оставшийся третий вывод.

Аналогично фазируется трехфазная машина при соединении обмоток треугольником.

Данный способ применяется и для определения направления вращения однофазных машин (асинхронные конденсаторные двигатели, двигатели с пусковой обмоткой). В этих двигателях обмотки расположены под углом  $90^\circ$  электрических. При повороте ротора (рис. 3.9.3) показания вольтметра, включенного на выводах  $\Pi_2$  и  $P_2$ , увеличиваются. Значит, указанное направление вращения сохранится и в рабочем режиме.

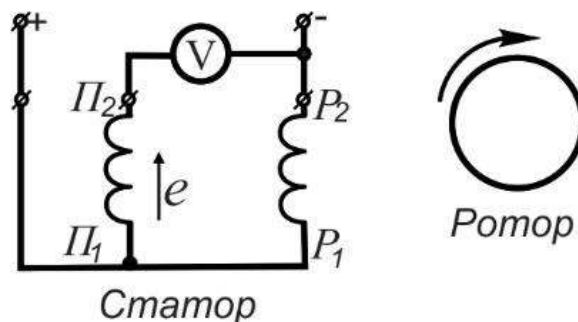


Рис. 3.9.3. Определение направления вращения однофазного двигателя переменного тока

### 3.10. Определение межвитковых замыканий в обмотках электрических машин

Для этого используют портативный дефектоскоп ПДО–1. Простейший дефектоскоп можно изготовить самому. Прибор состоит из сердечника 1 с конусными заплечиками, рис. 3.10.1.

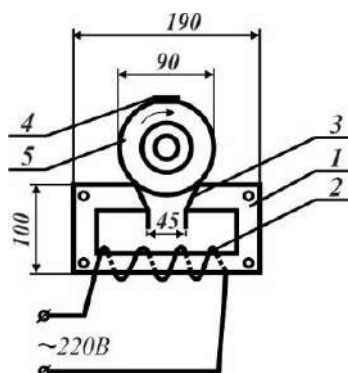


Рис. 3.10.1. Дефектоскоп:  
 1 – сердечник; 2 – катушка; 3 – конусные заплечики;  
 4 – стальная пластина, 5 – якорь

На сердечник наматывается 800–850 витков обмоточного провода диаметром 0,8 мм марок ПЭВ, ПВД и т.п. Предположим, что надо проверить обмотку якоря генератора. Для этого якорь 5 укладывают на заплечики сердечника прибора. Затем на пластины якоря параллельно им кладут стальную пластинку 4 из жести толщиной 0,25–0,35 мм, длиной 100–150 мм и шириной 10 мм.

Подключив катушку к сети, медленно вращают якорь, придерживая пластинку. Если в какой-либо паре витков повреждена изоляция, стальная пластинка притягивается.

Такой прибор используют и для выявления межвиткового замыкания в статорной обмотке электродвигателя. В этом случае вынимают ротор и стальную пластинку вводят внутрь статора.

### 3.11. Асинхронные электродвигатели (АД)

#### 3.11.1. Общие сведения

Назначение. Трехфазный асинхронный двигатель (АД) был изобретен русским инженером Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским в 1889 г. и с тех пор, подвергаясь усовершенствованиям, получил массовое распространение во всех странах мира. Изготавливаемый на мощности от долей вата до тысяч киловатт при напряжениях 220, 380, 660, 3000, 6000 и 10000 В этот электродвигатель прост по конструкции, надежен в эксплуатации, дешев по сравнению с другими электродвигателями.

В качестве генераторов асинхронные машины применяются крайне редко, основное применение – в качестве двигателей.

АД применяется во всех видах работ, где не требуется поддержания постоянной скорости вращения, а также в быту, в однофазном исполнении при малой мощности.

**Устройство и принцип действия.** Устройство двигателя показано на рис. 3.11.1. Асинхронный 3-фазный двигатель, как и все электрические двигатели, состоит из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося внутри него ротора. Как статор, так и ротор имеют обмотки из витков медного или алюминиевого проводника, уложенные в пазах. Роторная обмотка может быть либо фазной, при которой концы каждой фазы выводятся на контактные кольца, насаженные на валу ротора, либо замкнутой накоротко и не имеющей выводов.



Рис. 3.11.1. Устройство асинхронного двигателя

Принцип действия трехфазного АД основан на том, что переменный ток, проходя по трехфазной обмотке статора, создает вокруг него магнитное поле, вращающееся с частотой питающей сети. Силовые линии поля пересекают витки обмотки ротора (замкнутой либо накоротко, либо через сопротивление) и индуцируют в ней ЭДС, вызывающую в обмотке ротора ток. Ток ротора, в свою очередь, создает магнитное поле, взаимодействующее с вращающимся полем статора и заставляющее ротор вращаться в направлении, соответствующем направлению вращения поля статора.

### 3.11.2. Основные типы АД

В зависимости от конструктивного исполнения ротора АД делятся на два основных типа: двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором.

Наибольшее распространение во всех областях техники имеют дешевые в производстве и надежные в эксплуатации двигатели с короткозамкнутым ротором. Они обладают высокими техническими показателями (жесткая механическая характеристика:  $\cos \varphi_1 = 0,6-0,93$ ;  $\eta = 0,6-0,94$ ;  $K_M = 0,9-2,2$ ;  $K_I = 4-7,5$ ).

Широкое применение находят двигатели с вытеснением тока ротора (двигатели с глубоким пазом ротора и двигатели с двойной клеткой ротора). Обладают повышенным пусковым моментом ( $\frac{M_{II}}{M_H} = 1,5 - 2$  при  $\frac{I_{II}}{I_H} = 4 \div 7,5$ ).

Двигатели с фазным ротором применяются при необходимости плавного регулирования частоты вращения, а также при тяжелых условиях пуска. Они обладают наилучшими из всех АД пусковыми свойствами ( $\frac{M_{\Pi}}{M_H} = 2 \div 3$  при  $\frac{I_{\Pi}}{I_H} = 2,5 \div 4$ ).

Многоскоростные АД с переключением числа полюсов обмотки статора применяются в приводах со ступенчатым регулированием частоты вращения. Они имеют 2, 3 или 4 номинальные скорости вращения, жесткую механическую характеристику и пониженный коэффициент мощности  $\cos \varphi$ .

Двигатели с массивным ротором находят ограниченное применение из-за сравнительно мягкой характеристики и низкого  $\cos \varphi$ .

Конденсаторные АД предназначены для питания от однофазной сети и применяются в быту.

Существуют и другие типы АД, применяемые в специальных областях техники.

### 3.11.3. Скорость вращения и скольжение

Скорость вращения магнитного потока статора зависит от частоты  $f_c$  и от числа полюсов статорной обмотки:

$$n_c = \frac{60f_c}{\rho} \text{ об/мин,}$$

где  $f_c$  – частота сети, Гц;

$\rho$  – число пар полюсов.

Скорость вращения ротора меньше скорости вращения поля статора на величину скольжения. Это условие необходимо для работы АД, т.к. при синхронном вращении витки роторной обмотки не пересекались бы силовыми линиями поля статора, и в роторе не индуцировался бы ток.

Скольжение выражается в относительных единицах или процентах:

$$S = \frac{n_c - n_{2H}}{n_c}, \text{ или}$$

$$S = \frac{n_c - n_{2H}}{n_c} \cdot 100 \%,$$

где  $n_c$  – синхронная скорость вращения поля статора, об/мин,

$n_{2H}$  – номинальная скорость вращения ротора, об/мин.

Скольжение АД основного исполнения обычно находится в пределах  $S = 1,5 \div 8 \%$  (меньшая величина относится к более мощным двигателям). Промышленностью выпускаются специальные двигатели единой серии в модификации с повышенным скольжением ( $S = 0,08 \div 0,14$  или  $8 \div 14 \%$ ).

**Пример 3.11.3.** Определить скольжение двигателя, если  $n_c = 1000$  об/мин,  $n_{2H} = 920$  об/мин.

## Решение

$$S = \frac{1000-920}{1000} = 0,08, (8 \%).$$

### 3.11.4. Основные параметры АД

#### Номинальная мощность

Номинальная мощность АД – это полезная механическая мощность на валу (Вт, кВт, МВт) при номинальной нагрузке:

$$P_H = P_{2H} = \sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot I_{1H} \cos \varphi_{1H} \cdot \eta_H,$$

где  $U_{1H}$  – номинальное напряжение сети, кВ,

$I_{1H}$  – номинальный ток, А,

$\cos \varphi_{1H}, \eta_H$  – номинальные  $\cos \varphi$  и КПД двигателя, соответствующие номинальной мощности  $P_H$ .

Номинальные мощности АД независимо от областей их применения установлены ГОСТ 121319, кВт:

|      |      |      |       |      |      |      |      |
|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 0,12 | 0,18 | 0,25 | 0,37  | 0,55 | 0,75 | 1,1  | 1,5  |
| 2,2  | 3,0  | 4,0  | 5,5   | 7,5  | 11   | 15   | 18,5 |
| 22   | 30   | 37   | 45    | 55   | 75   | 90   | 110  |
| 132  | 160  | 200  | 250   | 315  | 400  | 500  | 630  |
| 800  | 1000 | 1250 | 1600  | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 |
| 5000 | 6300 | 8000 | 10000 |      |      |      |      |

Двигатели должны сохранять номинальную мощность  $P_H$  при отклонениях напряжения сети  $U_1$  от номинального  $U_{1H}$  в пределах от -5 до +10 %.

**Номинальный ток АД.** Номинальным током называется ток статора, соответствующий номинальному режиму работы,  $I_{1H}$ , А.

**Номинальная синхронная частота (скорость) вращения.** Номинальные синхронные частоты вращения  $n_c$  при частотах тока в диапазоне от 50 до 1000 Гц установлены ГОСТ 6697, об/мин:

$f = 50$  Гц  $n_c = 100; 125; 150; 166,6; 187,5; 250; 300; 375; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000.$

$f = 100$  Гц  $n_c = 3000; 6000.$

$f = 200$  Гц  $n_c = 1500; 3000; 4000; 6000; 8000; 12000.$

$f = 400$  Гц  $n_c = 1500; 3000; 4000; 6000; 8000; 12000.$

$f = 1000$  Гц  $n_c = 3000; 4000; 6000; 10000; 12000; 15000.$

Номинальные частоты вращения ротора АД ( $n_{2H}$ ) меньше указанных на частоту вращения, определяемую величиной номинального скольжения  $S_H$  (пример 3.11.3).

**Расчетная рабочая температура.** Под этим параметром понимают температуру, к которой приводятся сопротивления обмоток электрической машины при подсчете потерь в ней. Она принимается равной:

75 °С для обмоток, предельные допустимые превышения, температуры которых соответствуют классам нагревостойкости А, Е, В;

115 °С – классам нагревостойкости F, H.

**Перегрузка по току.** АД должны без повреждений и остаточных деформаций выдерживать перегрузку по току на 50 % ( $I_1 = 1,5I_{1H}$ ) в течение 2 мин.

**Перегрузка по скорости вращения.** АД должны выдерживать в течение 2 мин повышение частоты вращения на 20 % сверх наибольшей, но не менее чем на 50 % номинальной ( $n_2 = 1,5 n_{2H}$ ).

Направление вращения АД должно быть правым, если нет других указаний в стандартах или технических условиях.

**Номинальное значение высот оси вращения.** Эти параметры установлены ГОСТ 13267, мм:

25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000.

**Сопротивление изоляции обмоток.** Сопротивление изоляции обмоток АД относительно его корпуса и между обмотками при рабочей температуре двигателя должно быть не менее значения, получаемого по формуле (но не менее 0,5 Мом):

$$r = \frac{U_H}{1000 + P_H/100}, \text{ Мом},$$

где  $U_H$  – номинальное напряжение обмотки, В;

$P_H$  – номинальная мощность АД, кВт.

Измерения проводятся мегаомметром, номинальное напряжение которого выбирается в зависимости от номинального напряжения обмотки. Для обмоток с  $U_H < 660$  В применяют мегаомметры на 500 В, для обмоток с  $U_H < 3000$  В – мегаомметры на 1000 В, для обмоток с  $U_H > 3000$  В – мегаомметры на 2500 В.

В ГОСТ 183 нормы сопротивления изоляции не определены. Они могут быть установлены в стандартах на конкретные виды машин.

### 3.11.5. Опыт холостого хода

Холостой ход – это режим, при котором обмотка статора АД присоединена к сети ( $U_0 = U_H$ ); а механическая нагрузка на валу отсутствует ( $P_2 = 0$ ). В этом случае число оборотов ротора практически равно синхронному, а скольжение – нулю ( $n_2 \approx n_c, S \approx 0$ ). В режиме холостого хода снимают зависимости  $I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_0)$ . Обычно для нормальных АД при  $U_0 = U_H$  ток  $I_0 = (0,2 \div 0,7) I_H$ . Он тем больше по относительной величине, чем больше полюсов имеет машина и чем меньше ее мощность.

Мощность холостого хода  $P_0$  – это сумма потерь мощностей:

$$P_0 = P_m + P_{ст} + P_{мех} + P_d,$$

где  $P_M$  – потери в меди статора:

$$P_M = 3I_{0\phi}^2 \cdot r_{1\phi},$$

где  $P_{ст}$  – потери магнитные (в стали),

$P_{мех}$  – механические потери:

$$P_{мех} = 0,01P_{2H},$$

$P_D$  – добавочные потери:

$$P_D = 0,005P_{1H}.$$

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0I_0}.$$

С увеличением подводимого напряжения  $U_0$  коэффициент  $\cos \varphi_0$  уменьшается в результате значительного увеличения реактивной составляющей тока  $I_{0(p)}$ , т.е. полная мощность  $S_0 = \sqrt{3}U_0I_0$  с насыщением стали растет значительно быстрее активной мощности  $P_0$ .

### 3.11.6. Опыт короткого замыкания

Режим короткого замыкания характеризуется тем, что к обмотке статора подводят пониженное напряжение, равное  $U_K = (0,15 \div 0,25)U_H$ , а ротор замыкают накоротко (в случае фазного ротора) и затормаживают. При этом коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3}U_KI_K}.$$

Опыт короткого замыкания проводят для определения величин пускового тока  $I_{п.}$  и пусковой мощности, а также для определения направления вращения АД и исправности силовых цепей.

Пусковой ток электродвигателя определится:

$$I_{п.} = I_K \frac{U_H}{U_K}, \text{ А.}$$

Пусковая активная мощность или мощность короткого замыкания, соответствующая номинальному напряжению:

$$P_{п.} = P_K \left(\frac{U_H}{U_K}\right)^2, \text{ кВт.}$$

Пусковой начальный момент при  $U = U_H$ :

$$M_{п.} = M_K \left(\frac{U_H}{U_K}\right)^2, \text{ кГм,}$$

где  $M_K$  – момент, определенный при  $U = U_K$  при помощи тормозного устройства.

### 3.11.7. Коэффициент полезного действия АД

Коэффициент полезного действия (КПД) – это отношение отдаваемой активной мощности  $P_2$  к проводимой активной мощности  $P_1$ . КПД обычно выражается в процентах:

$$\eta = \frac{100P_2}{P_1}, \%$$

или в долях единицы:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Мощность  $P_1$ , потребляемая АД, измеряется с помощью ваттметров. Измерение механической мощности  $P_2$  затруднительно и требует специальных устройств, что усложняет определение КПД. Мощности  $P_1$  и  $P_2$  различаются на сумму потерь мощности в АД:

$$P_2 = P_1 - \Delta P, \text{ кВт, или}$$

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}.$$

В большинстве случаев применяют метод отдельного определения потерь по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Зависимость КПД от коэффициента загрузки  $\eta = f(k_3)$  представлена в виде [28]:

$$\eta = \frac{P_{2H}k_3}{P_{2H}k_3 + \Delta P_d},$$

где  $P_{2H}$  – номинальная мощность на валу, кВт,

$\Delta P_d$  – суммарные потери активной мощности в двигателе, кВт:

$$\Delta P_g = P_0 + P_k(k_3)^2 = P_{2H} \frac{1-\eta_H}{\eta_H} \cdot \frac{\gamma + (k_3)^2}{\gamma + 1}, \text{ кВт,}$$

$P_0$  – потери холостого хода в АД, кВт,

$P_k$  – потери в обмотках двигателя при  $k_3 = 1$  (номинальный режим), кВт,

$\gamma = \frac{P_0}{P_k}$  – расчетный коэффициент, зависящий от конструкции двигателя.

$\eta_H$  – КПД АД при  $k_3 = 1$ .

Коэффициент загрузки, при котором КПД достигает своего максимального значения:

$$k_{3,\text{опт.}} = \sqrt{\gamma}.$$

При наиболее часто встречающихся значениях  $\gamma = 0,5 \div 0,8$  коэффициент загрузки значительно меньше единицы и находится в диапазоне  $k_{3,\text{опт.}} = 0,7 \div 0,9$ . При изменении  $k_3$  от режима холостого хода до номинального режима ( $k_3 = 0 \div 1$ ), КПД АД имеет предел от 0 до номинального значения  $\eta = 0 \div \eta_H$ .

Номинальные величины КПД АД мощностью 0,06÷400 кВт серии 4А находятся в диапазоне  $\eta_n = 0,55 \div 0,94$  [45] (малые значения относятся к АД малой мощности).

### 3.11.8. Реактивная мощность АД

Реактивная мощность, потребляемая промышленным предприятием, определяется величиной намагничивающей мощности. Основными потребителями реактивной мощности являются асинхронные двигатели и трансформаторы, при этом на долю АД приходится свыше 60 % всей реактивной мощности ( $Q$ ). Величина потребления  $Q$  асинхронными двигателями зависит от коэффициентов  $k_3$  и  $\cos \varphi_n$ . При номинальной нагрузке и номинальном напряжении АД потребляет реактивную мощность, равную:

$$Q_n = \frac{P_n}{\eta_n} \cdot \operatorname{tg} \varphi_n, \text{ кВАр},$$

где  $\eta_n$  – КПД двигателя при полной нагрузке.

Реактивная мощность, потребляемая двигателем при холостом ходе:

$$Q_0 \approx \sqrt{3} U_n \cdot I_0, \text{ кВАр},$$

где  $I_0$  – ток холостого хода АД, А.

Для двигателей с  $\cos \varphi_n = 0,91 \div 0,93$  мощность  $Q_0 = 0,6Q_n$ , а для двигателей с  $\cos \varphi_n = 0,77 \div 0,79$  соответственно  $Q_0 = 0,7Q_n$ , т.е. чем выше номинальный  $\cos \varphi_n$ , тем относительно меньше  $Q_0$  (граничные значения  $Q_0 = 0,6 \div 0,85Q_n$ ).

Увеличение потребления реактивной мощности при полной нагрузке АД по сравнению с потреблением холостого хода:

$$\Delta Q_n = Q_n - Q_0 \approx \frac{P_n}{\eta_n} \operatorname{tg} \varphi_n - \sqrt{3} U_n I_0.$$

При нагрузках АД, меньших номинальной ( $k_3 < 1$ ), прирост потребления реактивной мощности по сравнению с холостым ходом пропорционален квадрату коэффициента загрузки:

$$\Delta Q_n = K_3^2 \Delta Q_n; \quad k_3 = \frac{P_2}{P_{2n}}.$$

Таким образом, реактивная мощность при произвольной нагрузке:

$$Q = Q_0 + \Delta Q_n \cdot K_3^2.$$

Реактивная нагрузка двигателя  $Q$  вызывает потери активной мощности в сети. Сумма активных потерь в сети от реактивной нагрузки называется приведенными активными потерями:

$$\Delta P_{\text{прив.}} = \Delta P_d + k_3 Q = P_0 + P_k K_3^2 + k_3 [Q_0 (1 - K_3^2) + Q_n K_3^2],$$

где  $k_3$  – экономический эквивалент реактивной мощности, кВт/кВАр,

$k_3 = 0,08 - 0,1$  – для потребителей, питающихся через три ступени трансформации.

Приведенный КПД:

$$\eta_{\text{прив.}} = \frac{P_{2H}k_3}{P_{2H}k_3 + \Delta P_{\text{прив.}}} = \frac{P_{2H}k_3}{P_{2H}k_3 + \Delta P_{\text{д}} + k_3 Q}$$

С энергетической точки зрения оптимальный коэффициент загрузки АД:

$$k_{3.0\text{пт.}} = \sqrt{\frac{P_0 + k_3 Q_0}{P_k + k_3 (Q_H - Q_0)}}$$

### 3.11.9. Коэффициент мощности АД

Коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) – это отношение активной потребляемой мощности к полной:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$$

Ясно, что чем больше  $\cos \varphi$ , тем большая часть полной мощности используется для полезной работы. Коэффициент мощности:

– 3-фазного АД:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_H I_1}$$

– 1-фазного АД:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_{\phi} I_{\phi}}$$

Номинальный коэффициент мощности для большинства АД составляет  $\cos \varphi_{1H} = 0,6 \div 0,92$  и зависит от мощности двигателя [45]. С ростом мощности и номинальной угловой скорости двигателя повышается номинальный коэффициент мощности.  $\cos \varphi$  АД в сильной степени зависит от нагрузки.

Коэффициент мощности холостого хода мал и составляет  $\cos \varphi_0 = 0,1 \div 0,3$  вследствие значительной реактивной мощности, затрачиваемой на создание потока, и малой активной мощности  $P_0$ , связанной лишь с постоянными потерями. По мере роста нагрузки до номинальной активная мощность растет быстрее реактивной и  $\cos \varphi$  возрастает до номинального значения.

#### 3.11.9.1. Коэффициент мощности АД при пуске

$$\cos \varphi_{\text{п}} = \frac{2 \cdot \cos \varphi_{1H} \cdot K_M}{K_I}, [28],$$

где  $K_I, K_M$  – кратности пусковых моментов и токов;

$\cos \varphi_{1H}$  – номинальное значение коэффициента мощности.

### 3.11.9.2. Коэффициент мощности АД при нагрузке

Изменения усредненных значений  $\cos \varphi$  асинхронных двигателей мощностью  $P_2 \leq 100$  кВт в зависимости от загрузки на валу приведены в табл. 3.11.9.2.1.

Таблица 3.11.9.2.1

Значения коэффициента мощности АД в зависимости от загрузки

| Значения $\cos \varphi$ в зависимости от $K_3$ |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|
| 1,0  | 0,75 | 0,5  | 0,25 | 0    |
| 0,92   | 0,9  | 0,86 | 0,62 | 0,25 |
| 0,9  | 0,89 | 0,83 | 0,59 | 0,24 |
| 0,88   | 0,86 | 0,8  | 0,56 | 0,23 |
| 0,86   | 0,84 | 0,77 | 0,54 | 0,22 |
| 0,84   | 0,81 | 0,72 | 0,51 | 0,21 |
| 0,82   | 0,78 | 0,69 | 0,47 | 0,2  |
| 0,8  | 0,76 | 0,67 | 0,44 | 0,18 |
| 0,78   | 0,73 | 0,65 | 0,42 | 0,16 |
| 0,76   | 0,7  | 0,6  | 0,4  | 0,15 |
| 0,74   | 0,68 | 0,58 | 0,37 | 0,14 |
| 0,72   | 0,66 | 0,55 | 0,34 | 0,13 |
| 0,7  | 0,64 | 0,53 | 0,32 | 0,11 |
| 0,68   | 0,61 | 0,5  | 0,3  | 0,1  |

*Примечание.*  $K_3 = 1$  – номинальный режим,  $K_3 = 0$  – холостой ход.

Коэффициент мощности АД при произвольной нагрузке:

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_1}{P_1}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_0 + \Delta Q_H K_3^2}{P_H K_3 / \eta}\right)^2}},$$

где  $\eta$  – КПД двигателя при данной нагрузке.

Как следует из формулы, замена систематически малозагруженных двигателей двигателями меньшей мощности способствует повышению  $\cos \varphi$  электроустановки. К мероприятиям по уменьшению потребления  $Q$  можно отнести и такие:

- 1) понижение напряжения у АД, систематически работающих с малой загрузкой;
- 2) ограничение холостой работы АД;
- 3) повышение качества ремонта двигателей.

Исследования показали, что если средняя нагрузка двигателя менее 45 % его номинальной мощности, то замена его менее мощным всегда целесообразна и проверки по условию рентабельности не требуется [28].

### 3.11.10. Вращающий момент АД

Вращающий момент на валу АД зависит от величины тока ротора  $I'_2$  и от магнитного потока  $\Phi$  [51]:

$$M = K' \Phi I'_2 \cos \psi_2,$$

где  $K'$  – конструктивная постоянная АД;

$\psi_2$  – угол сдвига между ЭДС и током ротора.

$$\cos \psi_2 = \frac{R'_2}{\sqrt{(R'_2)^2 + (X'_2)^2 \cdot S^2}},$$

где  $R'_2$  – вторичное приведенное активное сопротивление;

$X'_2$  – вторичное приведенное реактивное сопротивление;

$S$  – скольжение ротора.

Номинальный вращающий момент АД:

$$M_H = 975 \frac{P_{2H}}{n_H}, \text{ кГм},$$

или

$$M_H = 9550 \frac{P_{2H}}{n_H}, \text{ нм}.$$

Максимальный (опрокидывающий или критический) момент характеризует перегрузочную способность двигателя. Обычно кратность критического момента:

$$K_M = \frac{M_K}{M_H}.$$

Критический момент  $M_K$  и кратность критического момента  $K_M$  прямо пропорциональны квадрату изменения напряжения сети  $\frac{U^2}{U_H^2}$  и обратно пропорциональны квадрату изменения частоты сети  $\frac{f_H^2}{f^2}$ . Если величины  $U$  и  $f$  будут изменяться одновременно так, что их отношение сохранится постоянным, то и кратность  $K_M$  сохранится постоянной. Если двигатель 380 В, 50 Гц включить в сеть 60 Гц, то для сохранения неизменным максимального момента ( $M_K = const$ ) напряжение сети необходимо увеличить:

$$U = U_H \frac{f}{f_H} = 380 \cdot \frac{60}{50} = 456 \text{ В}.$$

Перегрузочная способность АД основного исполнения находится в пределах  $K_M = 1,7 \div 2,3$ .

Пусковой момент определяется отношением:

$$K_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_H}.$$

Кратность пускового момента АД с короткозамкнутым ротором  $K_{\Pi} = 1 \div 2$ .

Кратности моментов (пускового, максимального и минимального), а также кратность пускового тока приведены в каталоге на двигатель [45].

### 3.11.11. Механическая характеристика АД

Зависимость вращающегося момента АД от скольжения  $M = f(S)$  называется его естественной механической характеристикой, построение которой может быть произведено по формуле:

$$\frac{M_{дв.}}{M_K} = \frac{2+q}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + q},$$

где  $q$  – параметр, зависящий от конструктивных данных двигателя,

$S$  – текущее скольжение,

$M_K, S_K$  – критический момент и критическое скольжение, при котором имеет место максимальный момент  $M_K$ .

Критическое скольжение определится:

$$S_K = S_H (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}).$$

Величина  $q$  определяется выражением [13]:

$$q = \frac{2r_1 S_K}{r'_2},$$

где  $r_1$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

$r'_2$  – приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом.

Критическое скольжение в АД общего назначения обычно не выходит за пределы  $S_K = 0,07 \div 0,12$ . Если момент сопротивления при работе АД  $M_c > M_K$ , двигатель останавливается. Однако АД может быть пущен под нагрузкой только при условии, что  $M_c < M_{min}$ , иначе АД не разгонится и будет работать с большим скольжением (участок кривой от  $M_{min}$  до  $M_{п}$ ) – рис. 3.11.11.1. При  $S = 1$  ток АД в несколько раз превышает номинальный (рис. 3.11.11.1), поэтому частные и затяжные пуски приводят к перегреву обмоток.

#### Рабочие характеристики

Рабочими характеристиками АД называются зависимости подводимой мощности  $P_1$ , тока статора  $I_1$ , КПД  $\eta$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$ , скольжения  $S$  и момента сопротивления  $M$ , приложенного к валу двигателя, от полезной мощности  $P_2$  на валу при  $U_1 = U_{1H} = const$  и частоте  $f_1 = f_{1H} = const$ .

Статор двигателя присоединяют к сети  $U_1$  выключателем В через индукционный регулятор, служащий для поддержания номинального напряжения  $U_{1H}$  на зажимах обмотки статора (рис. 3.11.11.2).

Приборы при испытании подбирают в соответствии с номинальными данными АД. Нагрузку на валу создают каким-либо тормозным устройством, например электромагнитным тормозом. Момент на валу необходимо изменять от 0 до  $M_H$ , при этом  $M_H$  определим, зная паспортные данные –  $P_{2H}$  (кВт) и  $n_H$  (об/мин).

При проведении испытания записывают значения  $I_1, P_1, n_2, M$ . Остальные параметры определяют по формулам  $\eta = \frac{P_2}{P_1}; \cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1I_1}; S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ .

Рабочие характеристики АД приведены на рис. 3.11.11.3. Наибольший КПД достигается при нагрузке 0,85–0,9 от номинальной. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них в силу стандартной дискретной шкалы мощностей работают с некоторой недогрузкой.

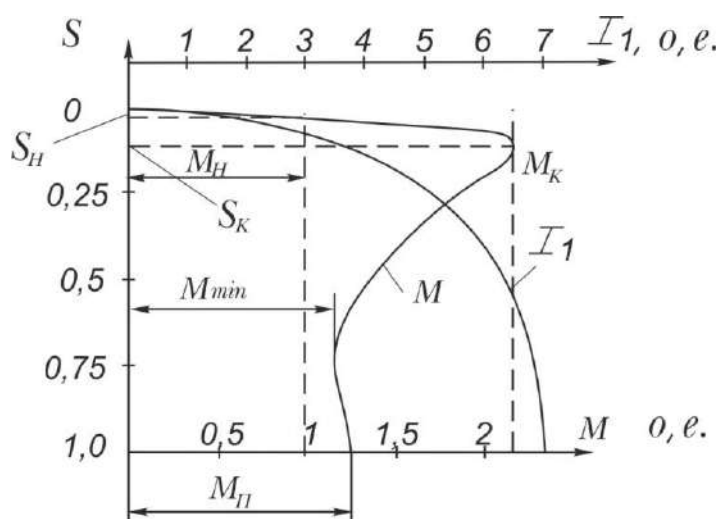


Рис. 3.11.11.1. Зависимость  $I_1 = f(S), M = f(S)$

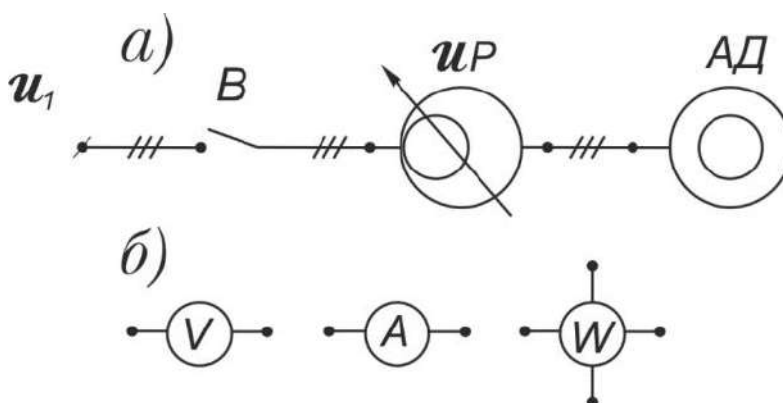


Рис. 3.11.11.2. Схема для снятия рабочих характеристик АД и приборы для измерения параметров

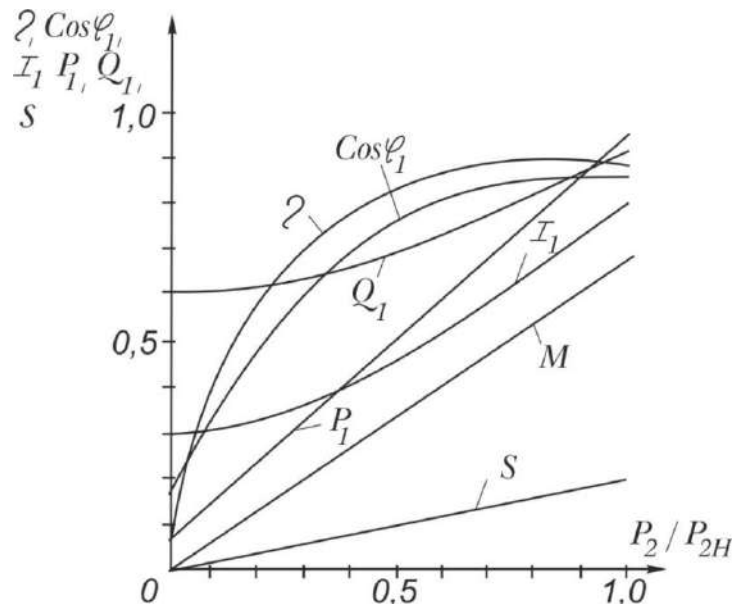


Рис. 3.11.11.3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

При эксплуатации АД с нагрузкой, существенно меньшей номинальной, уменьшается и КПД, и коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$ .

### 3.11.12. Пуск АД

Процесс пуска для АД является наиболее тяжелым режимом работы. При пуске, т.е. подаче напряжения на неподвижный АД, сопротивление его мало и токи ротора и статора имеют максимальное значение. Зависимость тока статора и сопротивления АД от скольжения  $S$  приведена на рис. 3.11.12.1.

Пусковой ток  $I_{\text{п}}$  состоит из переменной составляющей, затухающей по мере увеличения скорости  $n_2$ , и апериодической составляющей, которая затухает по экспоненте в течение 1–2 периодов ( $t_{\text{зат.}} \approx 0,02$  с).

Периодическая составляющая пускового тока  $I_{\text{п.пуск}}$  при неподвижном роторе обычно в 4–7 раз превосходит его номинальный ток. Максимальный пик тока с учетом апериодической составляющей достигает:  $I_{\text{а.п.}} = (1,6 \div 1,8) I_{\text{п.пуск}}$ .

Продолжительность затухания  $I_{\text{п.пуск}}$  до значения  $I_{\text{ном}}$  зависит от параметров двигателя и условий пуска.

Эксплуатация АД требует знания основных параметров:

- 1) кратность пускового тока  $K_I$ ;
- 2) кратность пускового момента  $K_M$ ;
- 3) пусковая мощность  $S_{\text{п}}$ ;
- 4) активная составляющая пусковой мощности  $P_{\text{п}}$ .

Эти данные необходимы для определения возможности пуска АД от сети ограниченной мощности и выбора пускорегулирующей аппаратуры. Величины  $K_I$  и  $K_M$  даны в каталогах на электродвигатели.

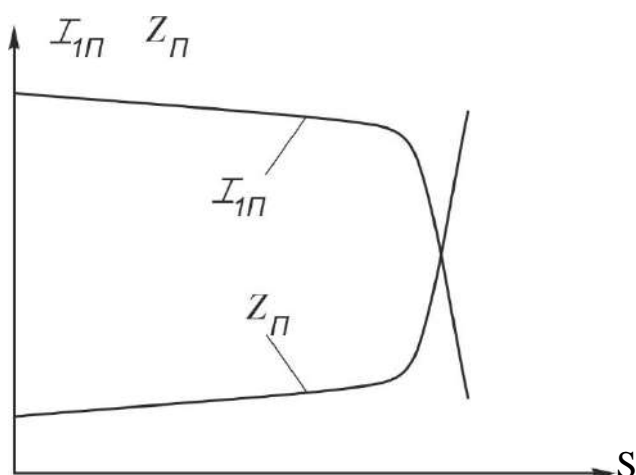


Рис. 3.11.12.1. Зависимость тока статора и сопротивления АД от скольжения  $S$

Средние значения  $K_I$  и  $K_M$  для АД серии 4А приведены в табл. 3.11.12.1.

Таблица 3.11.12.1

Средние значения  $K_I$  и  $K_M$  для АД серии 4А

| Параметр                | $P_{2H}, \text{кВт}$ |     |     |    |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------|----------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                         | 1,1                  | 2,2 | 5,5 | 11 | 22  | 37  | 55  | 110 | 200 | 315 |
| $K_I = I_{1п} / I_{1H}$ | 5                    | 6   | 7   | 7  | 7   | 7   | 7   | 7   | 7   | 7   |
| $K_M = M_{п} / M_H$     | 2                    | 2   | 2   | 2  | 1,4 | 1,4 | 1,2 | 1,2 | 1   | 1   |

**Пример 3.11.12.1.** Электродвигатель мощностью 55 кВт потребляет из сети  $I_{1H} = 102 \text{ А}$ , напряжение  $U_{1H} = 0,38 \text{ кВ}$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_{1H} = 0,9$ . Определить пусковые параметры  $I_{п}$ ,  $\cos\varphi_{п}$ ,  $S_{п}$ ,  $P_{п}$ ,  $Q_{п}$ .

**Решение**

По табл. 3.11.12.1 определяем:  $K_I = 7$ ;  $K_M = 1,2$ .

Коэффициент мощности при пуске [28]:

$$\cos\varphi_{п} = \frac{2\cos\varphi_{1H} \cdot K_M}{K_I} = \frac{2 \cdot 0,9 \cdot 1,2}{7} \approx 0,31.$$

Пусковой ток  $I_{п} = K_I \cdot I_{1H} = 7 \cdot 102 = 714 \text{ А}$ .

Пусковая мощность  $S_{п} = \sqrt{3} U_{1H} I_{п} = 1,73 \cdot 0,38 \cdot 714 = 469 \text{ кВА}$ .

Активная составляющая мощности  $P_{п} = S_{п} \cdot \cos\varphi_{п} = 469 \cdot 0,31 = 145 \text{ кВт}$ .

Реактивная пусковая мощность  $Q_{п} = P_{п} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{п} = 145 \cdot 3,07 = 445 \text{ кВАр}$ .

Пуск АД можно производить при полном напряжении (прямой пуск) и при пониженном напряжении.

Прямой пуск осуществляется при помощи рубильников, переключателей, магнитных пускателей и других пусковых аппаратов.

При прямом пуске к двигателю подается полное напряжение сети. Недостатком этого способа пуска являются большие пусковые токи, которые в 2–7 раз больше номинальных токов двигателей.

Пусковые характеристики АД с короткозамкнутым ротором приведены в табл. 3.11.12.2.

Таблица 3.11.12.2

Пусковые характеристики АД с короткозамкнутым ротором

| Двигатель нормального исполнения |                                | Двуклеточный двигатель         |                                | Двигатель с глубоким пазом     |                                |
|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $\frac{I_{\Pi}}{I_{\text{H}}}$   | $\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{H}}}$ | $\frac{I_{\Pi}}{I_{\text{H}}}$ | $\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{H}}}$ | $\frac{I_{\Pi}}{I_{\text{H}}}$ | $\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{H}}}$ |
| 4 ÷ 7                            | 0,8 ÷ 1,4                      | 3 ÷ 6                          | 1,1 ÷ 3                        | 4 ÷ 6                          | 1,1 ÷ 2                        |

Периодическая составляющая пускового тока  $I_{\Pi} = 3 \div 7 I_{\text{H}}$ .

Максимальный пик тока с учетом аperiodической составляющей:

$$I_{\text{ап}} = 1,6 \div 1,8 I_{\Pi} = 5 \div 12 I_{\text{H}}.$$

Кривая зависимости  $I_1 = f(t)$  при пуске АД приведена на рис. 3.11.12.2.

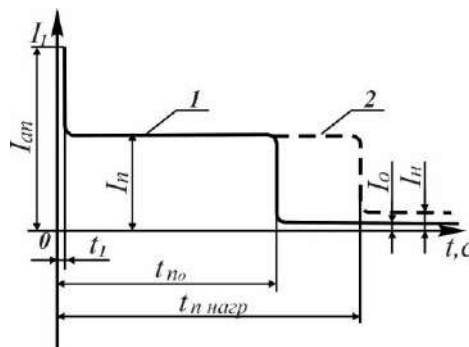


Рис. 3.11.12.2. Кривая зависимости  $I_1 = f(t)$  при пуске АД

Где  $t_1 = 0,01-0,02$  с;

$t_{\text{но}} = 0,5 \div 3,0$  с – время пуска без нагрузки, для мощных АД время  $t_{\text{но}} \leq 15$  с.

Как видно из рис. 3.11.12.2, величина пускового тока не зависит от нагрузки на валу; при пуске с нагрузкой увеличивается время пуска.

### 3.11.12.1. Тиристорные преобразователи напряжения для пуска АД

Силовая часть тиристорных преобразователей напряжения (ТПН) реализуется на основе тиристоров (рис. 3.11.12.1.1).

При помощи встречно-параллельно включённых тиристоров можно коммутировать цепи переменного тока и изменять действующие значения напряжения и тока на АД [35].

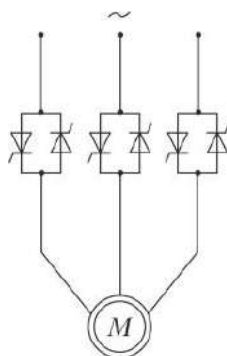


Рис. 3.11.12.1.1. Силовая схема питания АД на основе нереверсивного ТНП

Пусковой ток, как известно, пропорционален напряжению ( $I_{п} \equiv U_1$ ), а начальный пусковой момент – квадрату напряжения ( $M_{п} \equiv U_1^2$ ). Ограничение пускового тока приводит к затягиванию пускового процесса. Главное назначение регулятора – ограничить ударные пусковые моменты при частых и тяжелых пусках АД в условиях маломощной сети (обычно  $P_{2н} \geq 100$  кВт).

### 3.11.13. Ток холостого хода АД

У асинхронных двигателей ток  $I_0$  в значительной мере определяется намагничивающим током  $I_m$ . К сожалению, величина  $I_0$  не указывается ни в каталогах на электродвигатели, ни на их щитках. Опытное определение  $I_0$  весьма просто, если двигатель не смонтирован с рабочей машиной или же может быть легко от нее отсоединен. В противном случае измеренный ток будет выше, чем  $I_0$ , так как он будет определяться потерями холостого хода самой машины [6].

По величине  $I_0$  можно до известной степени судить о состоянии двигателя, например, контролировать качество ремонта.

В табл. 3.11.13.1 приведены значения коэффициента холостого хода  $I_0/I_{1н}$  в зависимости от номинального коэффициента мощности  $\cos\varphi_{1н}$ .

Таблица 3.11.13.1

Зависимость коэффициента холостого хода

|                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $I_0/I_{1н}$       | 0,6  | 0,55 | 0,5  | 0,45 | 0,4  | 0,35 | 0,3  | 0,25 | 0,2  |
| $\cos\varphi_{1н}$ | 0,69 | 0,73 | 0,76 | 0,79 | 0,83 | 0,86 | 0,89 | 0,92 | 0,95 |

### 3.11.14. Соединение обмоток в «звезду» и «треугольник» (Y и Δ)

Большинство заводов изготавливает АД с обмотками статора в Y по следующим причинам:

1. При одном и том же рабочем напряжении число витков:

$$W_Y = 0,58W_{\Delta}.$$

2. Теоретически количество меди  $m_Y = m_{\Delta}$ , но так как  $W_Y < W_{\Delta}$  то изоляция при соединении обмоток в  $\Delta$  занимает большую площадь в пазу, что уменьшает коэффициент заполнения пазы. Катушки с большим числом витков тонкой проволоки менее прочны, чем катушки с малым числом витков толстой проволоки, к тому же обходятся дороже.

3. Более благоприятные условия работы, чем при  $\Delta$ . Главное основание: невозможность протекания токов от гармоник 3-го и более высокого порядка.

В  $\Delta$  – наоборот, такие токи имеют место, и как следствие – пониженный коэффициент мощности и увеличенный нагрев.

При соединении в  $\Delta$  обмотка имеет следующие особенности:

1. АД развивает несколько больший момент на 1 ампер, чем при  $Y$ .

2. Соединение в  $\Delta$  выбирается в тех случаях, когда требуется пуск в ход с переключением со  $Y$  на  $\Delta$  или имеется в виду переключение с  $Y$  на  $\Delta$  при  $P_2 \leq 0,35P_{2н}$  для улучшения коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ).

3. С ростом мощности АД число витков на катушку уменьшается, поэтому у мощных АД выбор  $\Delta$  дает большие возможности получить полно-витковые катушки, т.к. при соединении в  $\Delta$  имеем зависимость:

$$U_{\phi(\Delta)}/U_{\phi(Y)} = \sqrt{3},$$

т.е. требуется больше витков. На практике применяются оба типа соединений. Линейные и фазные параметры при  $Y$  и  $\Delta$  приведены в табл. 3.11.14.1

Таблица 3.11.14.1

Зависимость линейных и фазных параметров от типа соединения обмоток

|   | $Y$                      | $\Delta$                        |
|---|--------------------------|---------------------------------|
| 1 | $I_Y = I_{\phi}$         | $I_{\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi}$ |
| 2 | $U_Y = \sqrt{3}U_{\phi}$ | $U_{\Delta} = U_{\phi}$         |

Если имеется двигатель, на паспорте которого написано 220/380 В, значит этот двигатель можно использовать на два напряжения: 220 и 380 В. Если линейное напряжение сети равно 220 В, то обмотки двигателя необходимо включить треугольником (рис. 3.11.14.1). Тогда  $U_{\phi} = 220$  В.

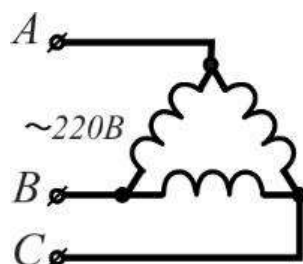


Рис. 3.11.14.1. Соединение обмоток в треугольник

При напряжении 380 В обмотки двигателя нужно включить звездой (рис. 3.11.14.2), тогда обмотка каждой фазы также будет под напряжением  $U_{\phi} = 220$  В.

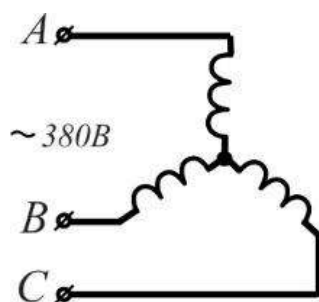


Рис. 3.11.14.2. Соединение обмоток в звезду

### 3.11.15. Допустимая плотность тока в обмотках статора

Значения допустимых плотностей тока в обмотках указаны в табл. 3.11.15.1.

Таблица 3.11.15.1

Допустимые плотности тока

| № п/п | Исполнение АД                        | $\delta = I/S, \text{ А/мм}^2$ |
|-------|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1     | Закрытые, невентилируемые            | 2,0–3,5                        |
| 2     | Закрытые, обдуваемые                 | 3,5–4,5                        |
| 3     | Защищенные, с радиальной вентиляцией | 4,5–6,5                        |
| 4     | С усиленной вентиляцией              | 6,5–8,5                        |

### 3.11.16. Допустимое число включений АД с короткозамкнутым ротором

Ориентировочно число допустимых включений в час нормально загруженного АД с короткозамкнутым ротором при механическом торможении электропривода:

$$Z = \frac{3600(\varepsilon_0 - \varepsilon)}{\kappa_1 \cdot t_{\text{п}}},$$

где  $\kappa_1$  – кратность пускового тока;

$t_{\text{п}}$  – время пуска электропривода, с;

$\varepsilon_0$  – номинальная относительная продолжительность включения (ПВ), о.е.;

$\varepsilon$  – фактическая относительная ПВ, о.е.:

$$\varepsilon = \frac{N}{N+R},$$

где N – время работы; R – пауза.

Стандартные  $\varepsilon$ : 0,15; 0,25; 0,4; 0,6. При электрическом торможении  $Z_{эл} = Z/2 \div Z/3$ , при реверсе  $Z_{рев} = Z/4$ .

Число пусков в час ( $Z$ ) некоторых рабочих машин приведены в табл. 3.11.16.1.

Таблица 3.11.16.1

Допустимое число пусков в час некоторых рабочих машин

| № п/п | Рабочие машины   | Z   |
|-------|--|-----|
| 1     | Резьбонарезные, строгальные станки   | 900 |
| 2     | Токарные (револьверные) станки   | 600 |
| 3     | Литейные краны   | 360 |
| 4     | Сверлильные, фрезерные, шлифовальные станки, стиральные машины, специальные подъемники | 250 |
| 5     | Небольшие подъемные установки  | 180 |
| 6     | Прессы для склейки дерева, токарные станки средней мощности                            | 120 |
| 7     | Большие станки (токарные, фрезерные, шлифовальные, сверлильные), пассажирские лифты    | 90  |
| 8     | Насосы, компрессоры, центрифуги, вентиляторы, типографские машины                      | 60  |

### 3.11.17. Трехфазный АД на двух фазах

Если обрыв одной фазы цепи статора произойдет во время работы АД, то двигатель будет вращаться при условии, что  $M_{max} > M_c$ . Однако пуск трехфазного двигателя при обрыве фазы невозможен (рис. 3.11.17.1). Специальная аппаратура для защиты электродвигателей от работы на двух фазах не выпускается. Используют автомат АП – 50, АЗІ и другие ( $P_2$  от -0,1 до + 315 кВт). При этом ток  $I_{тепл расщ} \approx I_{gb}$ .

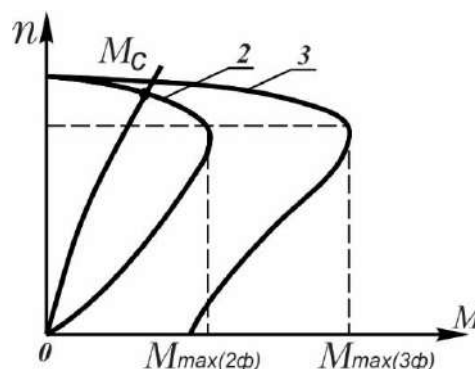


Рис. 3.11.17.1. Естественная характеристика АД при работе на двух и трех фазах

При обрыве фазы ток электродвигателя возрастает ( $I_1 = 1,5 \div 1,7I_N$ ) и автомат отключится. Такой защитой (но менее надежной) могут служить и тепловые реле в магнитных пускателях.

Для защиты электродвигателей от работы в неполнофазном режиме предлагается простое устройство [17] (рис. 3.11.17.2).

При перегорании плавкой вставки любого из предохранителей открывается тиристор и срабатывает реле Р, размыкая цепь катушки магнитного пускателя. При нормальном режиме работы двигателя устройство не является потребителем электроэнергии.

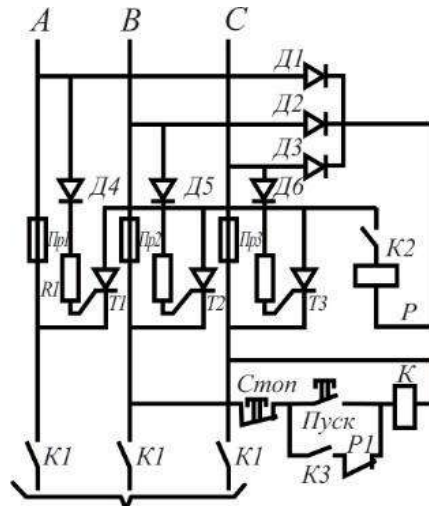


Рис. 3.11.17.2. Устройство для защиты АД

### 3.11.18. Трехфазный АД в однофазной сети

При работе от однофазной сети трехфазный АД может длительно развивать мощность, равную 0,5 – 0,85 его мощности в трехфазном номинальном режиме. Трехфазный АД может работать от однофазной сети как однофазный двигатель с пусковым элементом или как однофазный конденсаторный с постоянно включенной рабочей емкостью. Применение двигателя в качестве конденсаторного предпочтительнее из-за большей развиваемой мощности (до  $0,7 \div 0,85 P_{2H}$  в трехфазной сети).

Пусковая емкость:

$$C_{п} = C_{р} + C_{о} ,$$

где  $C_{р}$  – рабочая емкость,  $C_{о}$  – отключаемая емкость.

После пуска конденсатор  $C_{о}$  отключают. Рабочая емкость для различных схем определится (рис. 3.11.18.1, см. схемы а, б, в, г):

$$а) C_{р} = 2800 \frac{I_{H}}{U_{c}};$$

$$б) C_{р} = 4800 \frac{I_{H}}{U_{c}};$$

$$в) C_{р} = 1600 \frac{I_{H}}{U_{c}};$$

$$г) C_{р} = 2740 \frac{I_{H}}{U_{c}};$$

где  $C_{р}$  – рабочая емкость номинальной нагрузки, мкф;  $I_{H}$  – номинальный ток, А;

$U_{c}$  – напряжение сети, В.

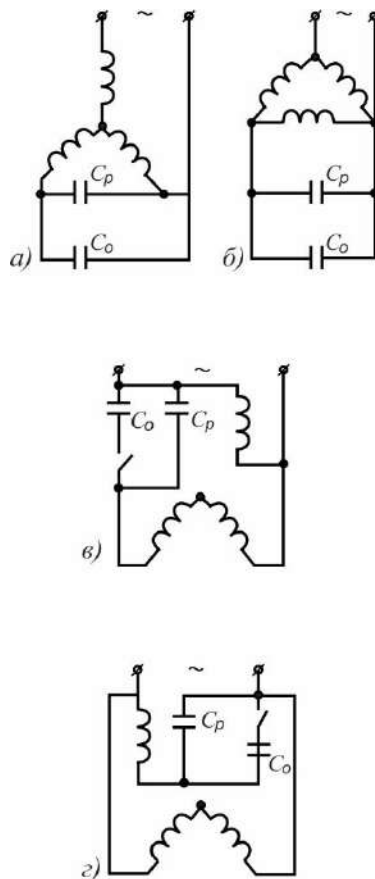


Рис. 3.11.18.1. Подключение АД к однофазной сети

При пуске без нагрузки  $C_o$  не требуется, –  $C_p$  будет и пусковой. При пуске под нагрузкой равной примерно номинальной ( $M_{\text{п}} \approx M_{\text{ном}}$ ) пусковая емкость определится следующим образом:

$$C_{\text{п}} = (2,5 \div 3,0) C_p.$$

Выбор конденсаторов по номинальному напряжению:

а) и б)  $U_{\text{к}} = 1,15 U$ ;

в)  $U_{\text{к}} = 2,2 - 2U$ ;

г)  $U_{\text{к}} = 1,3 \cdot U$ ,

где  $U_{\text{к}}$  – напряжение конденсатора, В;  $U$  – напряжение сети, В.

Трехфазный АД может быть включен в однофазную сеть через преобразователь однофазного напряжения в трехфазное. Симметрия выходного напряжения обеспечивается в данном случае преобразователем во всем диапазоне колебаний нагрузки (рис. 3.11.18.2).

При мощности преобразователя  $P_{\text{пр}} = 1 \text{ кВт}$ : дроссель – сечение магнитопровода  $S_{\text{м}} = 16-18 \text{ см}^2$ ; число витков  $\mathcal{W}_{\text{общ}} = 600 \div 700$ ,  $\mathcal{W}_1 : \mathcal{W}_2 : \mathcal{W}_3 = 1 : 1 : 2$ ; диаметр провода  $d = 1,3 \div 1,5 \text{ мм}$ ;  $X_L = 110 \text{ Ом}$ .

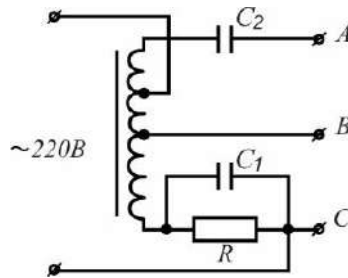


Рис. 3.11.18.2. Преобразователь однофазного напряжения в трехфазное

Дроссель с воздушным зазором. Конденсаторы:  $C_1$  – 40 мкФ, 350 В;  $C_2$  = 80 мкФ, 250 В; тип КБГ или МБГ – 4. При использовании конденсаторов типа МБГП или МБГО,  $U \approx 2U_{\text{ном}}$ . Резистор  $R = 140 \text{ Ом}$  ( $P \approx 400 \text{ Вт}$ ).

**Пример 3.11.18.** Электродвигатель А0 – 3I – 2,  $P = 0,6 \text{ кВт}$ , 127/220 В, 4,2/2,4 А (схема а). Пуск без нагрузки.

**Решение**

$$C_p = 2800 \frac{2,4}{220} = 30,5 \text{ мкф,}$$

$$U_k = 1,15U = 1,15 \cdot 220 = 253 \text{ В.}$$

Выбираем конденсатор с  $U_{\text{раб.}} = 250 \text{ В}$ .

### 3.11.19. Двухфазный АД

В двухфазном двигателе каждая фаза обычно занимает половину всех пазов статора и оси соседних катушек двух фаз смещены на половину полюсного деления.

Два переменных тока одинаковой амплитуды, одинаковой частоты, сдвинутые по фазе на 1/4 периода, называются двухфазными токами. Большое распространение получили двухфазные двигатели в автоматических устройствах при регулировании скорости или момента в зависимости от напряжения на одной из обмоток (амплитудное управление) или угла между векторами напряжений на обмотках (фазовое управление).

Схема двухфазного двигателя, включаемого с конденсатором в однофазную сеть, изображена на рис. 3.11.19.

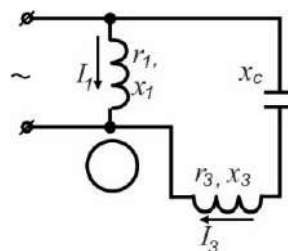


Рис. 3.11.19. Схема двухфазного двигателя, включаемого с конденсатором в однофазную сеть

### 3.11.20. Однофазный АД

Однофазный АД получил наибольшее распространение при мощности  $P_2, < 0,5$  кВт.

Схема включения однофазного АД с пусковой обмоткой приведена на рис. 3.11.20.1.

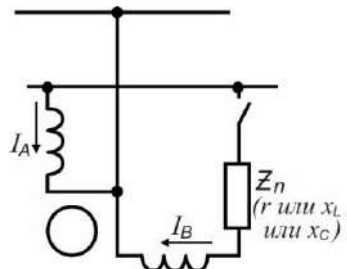


Рис. 3.11.20.1. Схема включения однофазного АД с пусковой обмоткой

### 3.11.21. Некоторые данные асинхронных двигателей серии А2 и А02

Единая серия асинхронных двигателей А2 и А02 мощностью от 0,6 до 100 кВт разделяет все двигатели на 9 габаритов. Диаметры и высота валов, номера подшипников электродвигателей А2 и А02 в зависимости от  $P_2$  и  $n_c$  даны в табл. 3.11.21.1.

Таблица 3.11.21.1

Диаметр вала, высота вала со шпонкой  
и номера подшипников для серии А2 и А02

| Га-барит | Ти-по-раз-мер | Диа-метр вала, мм | Высота вала со шпонкой мм | Номер под-шип-ника | $P_2, \text{кВт}$    |      |      |      |      |      |
|----------|---------------|-------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|------|------|------|------|------|
|          |               |                   |                           |                    | А2                   |      |      | А02  |      |      |
|          |               |                   |                           |                    | $n_c, \text{об/мин}$ |      |      |      |      |      |
|          |               |                   |                           |                    | 3000                 | 1500 | 1000 | 3000 | 1500 | 1000 |
| 1        | 11            | 18                | 20                        | 60304              | —                    | —    | —    | 0,8  | 0,6  | 0,4  |
|          | 12            | 18                | 20                        |                    | —                    | —    | —    | 1,1  | 0,8  | 0,6  |
| 2        | 21            | 22                | 24,5                      | 60305              | —                    | —    | —    | 1,5  | 1,1  | 0,8  |
|          | 22            | 22                | 24,5                      |                    | —                    | —    | —    | 2,2  | 1,5  | 1,1  |
| 3        | 31            | 28                | 31                        | 60306              | —                    | —    | —    | 3    | 2,2  | 1,5  |
|          | 32            | 28                | 31                        |                    | —                    | —    | —    | 4    | 3    | 2,2  |
| 4        | 41            | 32                | 35,5                      | 60308              | —                    | —    | —    | 5,5  | 4    | 3    |
|          | 42            | 32                | 35,5                      |                    | —                    | —    | —    | 7,5  | 5,5  | 4    |
| 5        | 51            | 38                | 41,5                      | 60309              | —                    | —    | —    | 10   | 7,5  | 5,5  |
|          | 52            | 38                | 41,5                      |                    | —                    | —    | —    | 13   | 10   | 7,5  |
| 6        | 61            | 42                | 45,5                      | 309                | 17                   | 13   | 7,5  | —    | 13   | 10   |
|          | 62            | 42                | 45,5                      |                    | 22                   | 17   | 13   | 17   | 17   | 13   |
| 7        | 71            | 48                | 52                        | 311                | 30                   | 22   | 17   | 22   | 22   | 17   |
|          | 72            | 48                | 52                        |                    | 40                   | 30   | 22   | 30   | 30   | 22   |
| 8        | 81            | 60                | 65,5                      | 314                | 55                   | 40   | 30   | 40   | 40   | 30   |
|          | 82            | 60                | 65,5                      |                    | 75                   | 55   | 40   | 55   | 55   | 40   |
| 9        | 91            | 70                | 76                        | 317                | 100                  | 75   | 55   | 75   | 75   | 55   |
|          | 92            | 70                | 76                        |                    | 125                  | 100  | 75   | 100  | 100  | 75   |

### 3.11.22. Трехфазные крановые асинхронные электродвигатели серий МТ и МТК

Технические показатели электродвигателей соответствуют ГОСТ 185 (табл. 3.11.22.1–3.11.22.3)

Электродвигатели серии МТФ выполняются с фазным ротором, серии МТКФ – с короткозамкнутым ротором. Класс нагревостойкости F.

Основным номинальным режимом является повторно – кратковременный с относительной продолжительностью включения 40 % (продолжительность цикла в соответствии с ГОСТ 183 принята 10 минут).

Изготавливаются электродвигатели на частоту 50 Гц и напряжение 380/220 В и 500 В при синхронной частоте вращения 1000, 750 и 600 об/мин. Климатическое исполнение У категории 2. По способу защиты от воздействия окружающей среды – закрытые обдуваемые.

Первая цифра трехзначного числа, стоящего после буквенного обозначения, условный внешний диаметр пакета статора; вторая – порядковый номер серии; третья – условная длина пакета статора. Цифра после тире обозначает число полюсов электродвигателя. Например, МТКФ 012–6 – крановый электродвигатель с короткозамкнутым ротором первого габарита, второй длины, шестиполусный. Электродвигатели нулевого габарита изготавливаются только в крановом исполнении, а электродвигатели 5, 6, 7 габаритов только в металлургическом – серия МТН (табл. 3.11.22.2).

Таблица 3.11.22.1

Технические данные крановых электродвигателей серии МТФ с фазным ротором 50 Гц, 220/380 и 500 В

| Тип       | $P_2$ , кВт,<br>при<br>ПВ = 40 % | $n_H$<br>об/мин | $I_H$ при<br>380 В,<br>А | $\cos \varphi_H$ | $\eta_H, \%$ | $I_{2H}, A$ | $U_{2H}, B$ | Масса,<br>кг |
|-----------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 1         | 2                                | 3               | 4                        | 5                | 6            | 7           | 8           | 9            |
| МТФ 011–6 | 1,4                              | 885             | 5,3                      | 0,65             | 61,5         | 9,1         | 116         | 51           |
| МТФ 012–6 | 2,2                              | 890             | 7,6                      | 0,68             | 64           | 11,5        | 144         | 58           |
| МТФ 111–6 | 3,5                              | 895             | 10,4                     | 0,73             | 70           | 15,0        | 176         | 76           |
| МТФ 112–6 | 5,0                              | 930             | 14,4                     | 0,70             | 75           | 15,7        | 216         | 88           |
| МТФ 211–6 | 7,5                              | 930             | 21,0                     | 0,70             | 77           | 19,8        | 256         | 120          |
| МТФ 311–6 | 11                               | 945             | 30,5                     | 0,69             | 79           | 42          | 172         | 170          |
| МТФ 312–6 | 15                               | 955             | 38,0                     | 0,73             | 82,0         | 46          | 219         | 210          |
| МТФ 411–6 | 22                               | 965             | 55,0                     | 0,73             | 83,5         | 60          | 235         | 280          |
| МТФ 412–6 | 30                               | 970             | 75,0                     | 0,71             | 85,5         | 83          | 255         | 345          |
| 1         | 2                                | 3               | 4                        | 5                | 6            | 7           | 8           | 9            |
| МТФ 311–8 | 7,5                              | 695             | 22,8                     | 0,68             | 73,0         | 21          | 245         | 170          |
| МТФ 312–8 | 11                               | 705             | 30,5                     | 0,71             | 77,0         | 43          | 165         | 210          |
| МТФ 411–8 | 15                               | 710             | 42,0                     | 0,67             | 81,0         | 48,8        | 206         | 280          |
| МТФ 412–8 | 22                               | 720             | 65,0                     | 0,63             | 82,0         | 57          | 248         | 345          |

Таблица 3.11.22.2

Технические данные металлургических электродвигателей МТН  
с независимой вентиляцией (продуваемых),  
с фазным ротором 50 Гц, 220/380 В, ПВ – 100 %

| Тип        | $P_2$ , кВт | $n_H$ об/мин | $I_H$ при 380 В, А | $\cos \varphi_H$ | $\eta_H$ , % | $I_{2H}$ , А | $U_{2H}$ , В | $n_{max}$ об/мин | Масса, кг |
|------------|-------------|--------------|--------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|-----------|
| МТН-511-8  | 28          | 715          | 70                 | 0,72             | 84,0         | 64           | 281          | 1900             | 470       |
| МТН-512-8  | 37          | 710          | 89                 | 0,74             | 85,0         | 77           | 305          | 1900             | 570       |
| МТН-611-10 | 45          | 570          | 112                | 0,72             | 85,0         | 154          | 185          | 1500             | 900       |
| МТН-612-10 | 60          | 575          | 138                | 0,76             | 87,0         | 154          | 248          | 1500             | 1070      |
| МТН-613-10 | 75          | 575          | 177                | 0,73             | 88,0         | 145          | 320          | 1500             | 1240      |
| МТН-711-10 | 100         | 584          | 246                | 0,69             | 89,5         | 233          | 272          | 1500             | 1550      |
| МТН-712-10 | 125         | 585          | 300                | 0,70             | 90,3         | 237          | 327          | 1500             | 1700      |
| МТН-713-10 | 160         | 586          | 392                | 0,68             | 91,0         | 244          | 408          | 1500             | 1900      |

Таблица 3.11.22.3

Технические данные крановых электродвигателей серии МТКФ  
с короткозамкнутым ротором 50 Гц, 220/380 и 500 В

| Тип       | $P_2$ , кВт, при ПВ = 40 % | $n_H$ об/мин | $I_H$ , А | $\cos \varphi_H$ | $\eta_H$ , % | $I_{пуск}$ при 380 В, А | Масса, кг |
|-----------|----------------------------|--------------|-----------|------------------|--------------|-------------------------|-----------|
| МТКФ0П-6  | 1,4                        | 875          | 5,2       | 0,66             | 61,5         | 15                      | 47        |
| МТКФ012-6 | 2,2                        | 880          | 7,2       | 0,69             | 67           | 22                      | 53        |
| МТКФП-6   | 3,5                        | 885          | 9,4       | 0,79             | 72           | 35                      | 70        |
| МТКФП2-6  | 5                          | 895          | 13,8      | 0,74             | 74           | 53                      | 80        |
| МТКФ211-6 | 7,5                        | 880          | 19,5      | 0,77             | 75,5         | 78                      | 110       |
| МТКФ3П-6  | 11                         | 910          | 28,5      | 0,76             | 77,5         | 130                     | 155       |
| МТКФ312-6 | 15                         | 930          | 36,0      | 0,78             | 81           | 205                     | 195       |
| МТКФ4П-6  | 22                         | 935          | 51        | 0,79             | 82,5         | 275                     | 255       |
| МТКФ412-6 | 30                         | 935          | 70,0      | 0,78             | 83,5         | 380                     | 315       |
| МТКФ311-8 | 7,5                        | 690          | 21,8      | 0,71             | 73,5         | 95                      | 155       |
| МТКФ312-8 | 11                         | 700          | 29,0      | 0,74             | 78,0         | 150                     | 195       |
| МТКФ4П-8  | 15                         | 695          | 40        | 0,71             | 80           | 185                     | 255       |
| МТКФ412-8 | 22                         | 700          | 60        | 0,69             | 80,5         | 295                     | 315       |

### 3.11.23. Трехфазные асинхронные короткозамкнутые электродвигатели серии ВАО

Электродвигатели единой серии ВАО (табл. 3.11.23.1) относятся к взрывозащищенным, выполненным во взрывонепроницаемой оболочке. Электродвигатели поставляются на напряжение 380 или 660 В.

В обозначении электродвигателей первая цифра означает порядковый номер наружного диаметра статора (габарит), вторая – номер длины пакета статора, цифра после дефиса – число полюсов. Например, ВАО34 – 2 электродвигатель в взрывонепроницаемый, асинхронный, обдуваемый, третьего габарита, четвертой длины, двухполюсный.

Электродвигатели серии ВАО разработаны на базе серии АО2, поэтому у них полностью совпадают наружные диаметры (габариты), длина пакетов статора и установочные пакеты.

Электродвигатели имеют ряд модификаций – специальные для среды четвертой категории – химически стойкие, крановые, многоскоростные и другие.

Таблица 3.11.23.1

Технологические данные электродвигателей серии ВАО напряжением 380/660В основного исполнения, с маркировкой по взрывозащите ВЗГ

| Тип    | P <sub>н</sub> кВт, при частоте вращения, об/мин |      |      |     |     | Масса, кг |
|--------|--|------|------|-----|-----|-----------|
|        | 3000   | 1500 | 1000 | 750 | 600 |           |
| ВАО71  | 0,4  | 0,27 | –    | –   | –   | 20        |
| ВАО072 | 0,6  | 0,4  | –    | –   | –   | 21        |
| ВАО11  | 0,8  | 0,6  | 0,4  | –   | –   | 25        |
| ВАО12  | 1,1  | 0,8  | 0,6  | –   | –   | 26,5      |
| ВАО21  | 1,5  | 1,1  | 0,8  | –   | –   | 44        |
| ВАО22  | 2,2  | 1,5  | 1,1  | –   | –   | 49        |
| ВАО31  | 3,0  | 2,2  | 1,5  | –   | –   | 62        |
| ВАО32  | 4,0  | 3,0  | 2,2  | –   | –   | 69        |
| ВАО41  | 5,5  | 4,0  | 3,0  | 2,2 | –   | 96        |
| ВАО42  | 7,5  | 5,5  | 4,0  | 3,0 | –   | 108       |
| ВАО51  | 10   | 7,5  | 5,5  | 4,0 | –   | 135       |
| ВАО52  | 13   | 10   | 7,5  | 5,5 | –   | 148       |
| ВАО61  | –  | 13   | 10   | 7,5 | –   | 165       |
| ВАО62  | 17   | 17   | 13   | 10  | –   | 190       |
| ВАО71  | 22   | 22   | 17   | 13  | –   | 285       |
| ВАО72  | 30   | 30   | 22   | 17  | –   | 325       |
| ВАО81  | 40   | 40   | 30   | 22  | 17  | 390       |
| ВАО82  | 55   | 55   | 40   | 30  | 22  | 435       |
| ВАО91  | 75   | 75   | 40   | 30  | 30  | 640       |
| ВАО92  | 100  | 100  | 75   | 55  | 40  | 745       |
| ВАО101 | 132  | 132  | 110  | 75  | 55  | 1060      |
| ВАО102 | 160  | 160  | 132  | 110 | 75  | 1170      |
| ВАО111 | 200  | 200  | 160  | 132 | 110 | 1475      |
| ВАО112 | 250  | 250  | 200  | 160 | 132 | 1645      |
| ВАО121 | 320  | 320  | 250  | 200 | 160 | 2000      |
| ВАО122 | –  | –    | 320  | 250 | 200 | 2250      |

### 3.11.24. Трехфазные асинхронные короткозамкнутые электродвигатели единой серии 4А

Единая серия электродвигателей 4А напряжением до 1000 В выпускается с 1975 года в соответствии с ГОСТ 19523. Стандарт распространяется на АД с короткозамкнутым ротором основного исполнения. Он охватывает

17 габаритов с высотами оси вращения от 50 до 355 мм в диапазоне мощностей от 0,06 до 315 кВт с синхронной частотой вращения 3000, 1500, 1000, 750, 600 и 500 об/мин.

Эти электродвигатели по сравнению с двигателями серии А2 и А02 имеют следующие преимущества:

- 1) меньшую массу (в среднем на 18 %);
- 2) большую компактность;
- 3) большие пусковые моменты;
- 4) повышенную надежность. Вероятность безопасной работы принята от 0,9 при 1000 часов наработки, а средний срок службы электродвигателей 4А равен 15 годам при наработке 40000 час;
- 5) меньший уровень шума и вибрации.

Электродвигатели серии 4А сельскохозяйственного назначения имеют повышенный  $M_n$ , что обеспечивает их запуск и устойчивую работу при пониженном напряжении.

Буквы и цифры, обозначающие марку двигателя, расшифровываются следующим образом:

- 1) начальная цифра – номер серии – 4;
- 2) следующая за цифрой буква (А) указывает род двигателя – асинхронный;
- 3) вторая буква – исполнение двигателя (Н – защищенный IP23, для закрытых буква не проставляется);
- 4) третья буква – исполнение двигателя по материалу станины и щитов (А – станина и щиты – алюминиевые; Х – станина алюминиевая, щиты чугунные; отсутствие буквы означает, что станина и щиты чугунные или стальные);
- 5) три или две последующие цифры – высоту оси вращения в мм от 50 до 355;
- 6) последующие буквы – установочные размеры по длине станины (S – короткая, М – средняя, L – длинная);
- 7) в двигателях с одинаковыми длинами сердечников статора – применены дополнительные обозначения сердечников:  
А – короткие, В – длинные;
- 8) последующие цифры – 2, 4, 6, 8, 10, 12 – число полюсов;
- 9) конечные буквы и цифры – климатическое исполнение и категория размещения.

4АН180М2У3 – серия 4, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором защищенного исполнения, со станиной и щитами из чугуна, высота оси вращения 180 мм, размеры по станине М, двухполюсный, для районов умеренного климата, третьей категории размещения.

4АА56А2У3 – электродвигатель серии 4, асинхронный закрытого исполнения, станина и подшипниковые щиты из алюминия, высота оси

вращения 56 мм, сердечник первой длины, двухполюсный, для районов умеренного климата, третьей категории размещения.

4A112MB6У3 – серия 4, асинхронный, закрытого исполнения, станина и щиты из чугуна, высота оси вращения 112 мм, с установочным размером М по длине корпуса, сердечник второй длины, 6 – полюсный, для районов умеренного климата, третьей категории размещения.

Таблица 3.11.24.1

Технические данные электродвигателей серии 4А основного исполнения

| Высота<br>оси, мм | P <sub>2н</sub> , кВт |      |      |      | Диаметр<br>вала, мм |
|-------------------|-----------------------|------|------|------|---------------------|
|                   | 3000                  | 1500 | 1000 | 750  |                     |
| 50А               | 0,09                  | 0,06 | –    | –    | 9                   |
| 50В               | 0,12                  | 0,09 |      |      | 9                   |
| 56А               | 0,18                  | 0,12 |      |      | 11                  |
| 56В               | 0,25                  | 0,18 |      |      | 11                  |
| 63А               | 0,37                  | 0,25 | 0,18 |      | 14                  |
| 63В               | 0,55                  | 0,37 | 0,25 |      | 14                  |
| 71А               | 0,75                  | 0,55 | 0,37 |      | 19                  |
| 71В               | 1,1                   | 0,75 | 0,55 | 0,25 | 19                  |
| 80А               | 1,5                   | 1,1  | 0,75 | 0,37 | 22                  |
| 80В               | 2,2                   | 1,5  | 1,1  | 0,55 | 22                  |
| 90 L              | 3,0                   | 2,2  | 1,5  | 0,75 | 24                  |
| 100 S             | 4,0                   | 3,0  | –    | –    | 28                  |
| 100 L             | 5,5                   | 4,0  | 2,2  | 1,5  | 28                  |
| 112M              | 7,5                   | 5,5  | –    | –    | 32                  |
| 112MA             | –                     | –    | 3,0  | 2,2  | 32                  |
| 112MB             | –                     | –    | 4,0  | 3,0  | 32                  |
| 132 S             | –                     | 7,5  | 5,5  | 4,0  | 38                  |
| 132M              | 11                    | 11   | 7,5  | 5,5  | 38                  |
| 160 S             | 15                    | 15   | 11   | 7,5  | 42/48               |
| 160M              | 18,5                  | 18,5 | 15   | 11   | 42/48               |
| 180-S             | 22                    | 22   | –    | –    | 48/55               |
| 180M              | 30                    | 30   | 18,5 | 15   | 48/55               |
| 200M              | 37                    | 37   | 22   | 18,5 | 60                  |
| 200 L             | 45                    | 45   | 30   | 22   | 55/60               |
| 225M              | 55                    | 55   | 37   | 30   | 55/65               |
| 250S              | 75                    | 75   | 45   | 37   | 65/75               |
| 250M              | 90                    | 90   | 55   | 45   | 65/75               |
| 280S              | 110                   | 110  | 75   | 55   | 70/80               |
| 280M              | 132                   | 132  | 90   | 75   | 70/80               |
| 315S              | 160                   | 160  | 110  | 90   | 75/90               |
| 315M              | 200                   | 200  | 132  | 110  | 75/90               |
| 355S              | 250                   | 250  | 160  | 132  | 85/100              |
| 355M              | 315                   | 315  | 200  | 160  | 85/100              |

*Примечание.* В числителе приведены диаметры валов для 2 полюсов, в знаменателе – для 4, 6, 8 полюсов.

Высота осей вращения и диаметры валов в зависимости от мощности электродвигателя и скорости вращения серии 4А приведены в табл. 3.11.24.1. Буквы L, S, М – установочные размеры по длине корпуса; А, В – первая и вторая длина сердечника.

Долговечность подшипников двигателей серии 4А, оцениваемая расчетной наработкой, установлена нормативной документацией. Расчетная наработка подшипников для двигателей основного исполнения согласно ГОСТ 19523 должна быть не менее 14000 ч. Типы подшипников, применяемых в двигателях серии 4А, приведены в табл. 3.11.24.2.

Таблица 3.11.24.2

Типы подшипников, применяемых в двигателях серии 4А

| Высота оси вращения, мм | Сторона основного выступающего конца вала                       |          | Противоположная сторона |
|-------------------------|---|----------|-------------------------|
|                         | Группа конструктивных исполнений по способу монтажа (ГОСТ 2479) |          |                         |
|                         | IM1   | IM1, IM2 | IM1, IM2, IM3           |
| 50                      | 180500  | 180500   | 180500                  |
| 56                      | 180501  | 180501   | 180501                  |
| 63                      | 180502  | 180502   | 180502                  |
| 71                      | 180604  | 180604   | 180604                  |
| 80                      | 180605  | 180605   | 180605                  |
| 90                      | 180605  | 180605   | 180605                  |
| 100                     | 180606  | 180606   | 180606                  |
| 112                     | 180607  | 180607   | 180607                  |
| 132                     | 180609  | 180609   | 180609                  |
| 160                     | 2310  | 310      | 310                     |
| 180                     | 2312  | 312      | 312                     |
| 200                     | 2313  | 313      | 313                     |
| 225                     | 2314  | 314      | 314                     |
| 250                     | 2317  | 317      | 317                     |
| 280                     | 2317  | 2317     | 317                     |
| 315                     | 2319  |          | 319                     |
| 355                     | 2322  |          | 322                     |

В двигателях с высотами оси вращения 160–250 мм при  $2p = 2$  с обеих сторон установлены шарикоподшипники.

### 3.11.25. Асинхронные электродвигатели серии АИ

Из табл. 3.11.25.1 сравнительных данных электродвигателей серий АО, АО2, Д, 4А, АИ с высотой оси вращения 90 мм видно, как росли мощности и энергетические показатели, а также снижалась масса двигателей одного и того же габарита.

Внедрение электродвигателей серии АИ началось с 1984 г. [34].

Таблица 3.11.25.1

Сравнительные данные электродвигателей серий АО, АО2, Д, 4А, АИ

| Серия | Год разработки | Мощность кВт | Уд. масса, кг/кВт | кпд, % | cos φ |
|-------|----------------|--------------|-------------------|--------|-------|
| АО    | 1949           | 0,4          | 22,5              | 70     | 0,76  |
| АО2   | 1962           | 0,8          | 15                | 73,5   | 0,78  |
| Д     | 1965           | 1,5          | 14                | 80     | 0,83  |
| 4А    | 1971           | 2,2          | 10                | 80,5   | 0,84  |
| АИ    | 1981           | 2,2          | 7                 | 82     | 0,86  |

### 3.11.26. Технические данные однофазных асинхронных электродвигателей серии АОЛБ

Таблица 3.11.26.1

Технические данные электродвигателей серии АОЛБ

| Тип       | P <sub>н</sub> , Вт, | n <sub>н</sub> об/мин | I <sub>н</sub> , А при U <sub>н</sub> , В |      |      | η <sub>н</sub> , % | cos φ | I <sub>п</sub> /I <sub>н</sub> |
|-----------|----------------------|-----------------------|---|------|------|--------------------|-------|--------------------------------|
|           |                      |                       | 127                                       | 220  | 380  |                    |       |                                |
| АОЛБ011-4 | 18                   | 1370                  | 1,05                                      | 0,61 | 0,35 | 22                 | 0,62  | 6,5                            |
| АОЛБ012-4 | 30                   | 1390                  | 1,38                                      | 0,8  | 0,46 | 28                 | 0,62  | 6,5                            |
| АОЛБ11-4  | 50                   | 1420                  | 1,9                                       | 1,1  | 0,65 | 34                 | 0,62  | 7,5                            |
| АОЛБ12-4  | 80                   | 1420                  | 2,5                                       | 1,45 | 0,85 | 41                 | 0,62  | 7,5                            |
| АОЛБ21-4  | 120                  | 1420                  | 3,3                                       | 1,9  | 1,1  | 47                 | 0,62  | 7,5                            |
| АОЛБ22-4  | 180                  | 1420                  | 4,3                                       | 2,5  | 1,45 | 53                 | 0,62  | 7,5                            |
| АОЛБ31-4  | 240                  | 1440                  | 5,7                                       | 3,3  | 1,9  | 60                 | 0,62  | 7,5                            |
| АОЛБ32-4  | 400                  | 1440                  | 7,6                                       | 4,4  | 2,55 | 67                 | 0,62  | 7,5                            |
| АОЛБ11-2  | 30                   | 2880                  | 0,85                                      | 0,49 | 0,28 | 41                 | 0,68  | 8,0                            |
| АОЛБ012-2 | 50                   | 2880                  | 1,18                                      | 0,68 | 0,39 | 48                 | 0,70  | 8,0                            |
| АОЛБП-2   | 80                   | 2890                  | 1,75                                      | 1,0  | 0,6  | 51                 | 0,72  | 7,5                            |
| АОЛБ12-2  | 120                  | 2890                  | 2,4                                       | 1,4  | 0,8  | 55                 | 0,72  | 7,5                            |
| АОЛБ21-2  | 180                  | 2890                  | 3,3                                       | 1,9  | 1,1  | 59                 | 0,72  | 7,5                            |
| АОЛБ22-2  | 240                  | 2890                  | 4,7                                       | 2,7  | 1,5  | 63                 | 0,72  | 7,5                            |
| АОЛБ31-2  | 400                  | 2920                  | 6,55                                      | 3,8  | 2,15 | 66                 | 0,72  | 9,0                            |
| АОЛБ32-2  | 600                  | 2940                  | 9,5                                       | 5,5  | 3,2  | 69                 | 0,72  | 9,0                            |

### 3.11.27. Самозапуск АД

При отключении двигателя от сети ЭДС статора мгновенно исчезает, но т.к. E<sub>2s</sub> сохраняется, то в обмотке статора наводится ЭДС в начальный момент:

$$E_{2s} \approx E_1 \approx U_{ном}.$$

Далее ее изменение происходит по формуле:

$$U_t = U_{ном} e^{-at}.$$

Схема устройства автоматического повторного включения (АПВ) приведена на рис. 3.11.27.1.

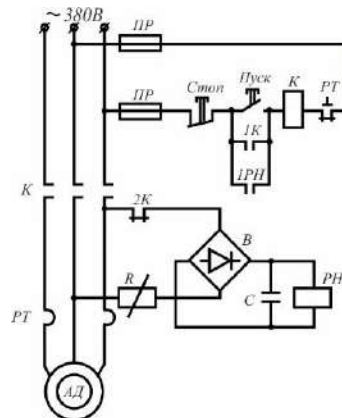


Рис. 3.11.27.1. Схема устройства автоматического повторного включения (АПВ)

За время снижения напряжения на зажимах статора двигателя от 380 В до 20 В обеспечивается нормальная работа реле напряжения РН.

Выдержка времени для контакта РН для различных типов двигателей  $\Delta t = 2 \div 4$  с.

Подробнее о самозапуске электродвигателей см. [55].

### 3.11.28. Самовозбуждение АД

Условия самовозбуждения асинхронных двигателей:

1. Большая компенсирующая емкость  $C_K$  (рис. 3.11.28.1).
2. Значительное активное сопротивление линии  $R_\Delta$  от трансформатора до  $C_K$ .
3. Малая мощность питающего трансформатора.
4. Небольшая (менее 5 ÷ 10 %) нагрузка РУ в зоне включения емкости.

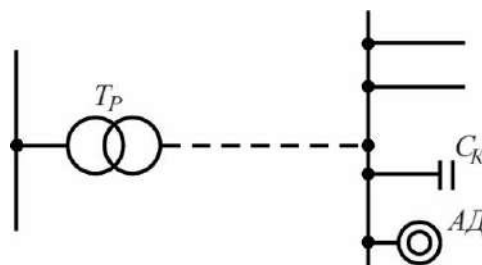


Рис. 3.11.28.1. Схема самовозбуждения АД

Самовозбуждение наиболее вероятно при критической скорости  $n_{кр} = 0,95 \div 1,0 n_{ном}$  и может наступить не только в процессе пуска АД, но и во время нормальной работы при изменении нагрузки на валу. След-

стве – перегруз статора током, отключение АД защитой или повреждение (при отсутствии защиты). Персонал ошибочно объясняет это перегрузкой или различными неисправностями. Вывод из самовозбуждения – отключить часть конденсаторов.

### 3.11.29. Регулирование скорости вращения АД

Скорость вращения ротора АД:

$$n_2 = n_0(1 - S) = \frac{60f_1}{p}(1-S),$$

Из формулы следует, что скорость  $n_2$  можно регулировать изменением какой-либо из трех величин: числа пар полюсов  $p$ , частоты  $f_1$  тока питающей сети, скольжения  $S$ .

Наибольшее применение получили следующие способы регулирования скорости вращения асинхронного двигателя:

- а) введением сопротивления в цепь статора или ротора;
- б) изменением числа полюсов;
- в) изменением частоты питающего напряжения;
- г) каскадным включением АД с другими машинами или вентильными преобразователями.

Для возможности изменения числа пар полюсов статор выполняют либо с двумя самостоятельными трехфазными обмотками, либо с одной трехфазной обмоткой, которую можно переключать на различные числа полюсов.

В эксплуатации электроприводов встречаются многоскоростные двигатели, синхронные скорости вращения ( $n_0$ ) которых равны 3000, 1500, 1000 и 750 об/мин. При переключении обмоток статора с меньшего числа полюсов на большее АД автоматически переходит в генераторный режим с отдачей активной энергии в сеть, а затем в двигательный режим с соответствующей меньшей скоростью (точки  $a_1$ ,  $a_2$  рис. 3.11.29.1).

Регулировку скорости  $n_2$  путем изменения числа полюсов можно производить только у АД с к.з. ротором.

Для изменения частоты  $f_1$  тока, подводимого к обмотке статора, служат специальные преобразователи частоты. Регулировку изменения  $f_1$  тока выгодно производить, когда имеется большая группа двигателей, требующих совместного плавного регулирования  $n_2$  (рольганги, текстильные станки и т.п.). Для обеспечения высокой жесткости механических характеристик АД и достаточной перегрузочной способности нужно одновременно с частотой тока  $f_1$  регулировать величину напряжения  $U$  так, чтобы магнитный поток  $\Phi$ , пропорциональный отношению  $U/f_1$ , оставался постоянным (рис. 3.11.29.2).

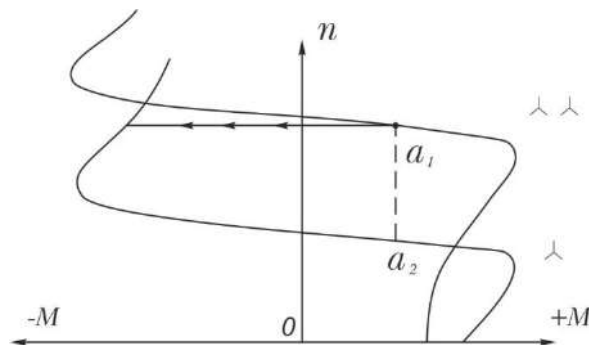


Рис. 3.11.29.1. Переключение с меньшего числа полюсов на большее ( $M = \text{const}$ )

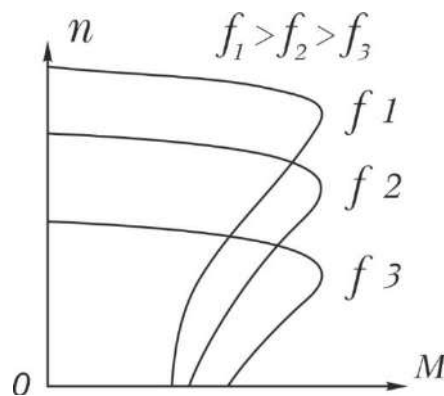


Рис. 3.11.29.2. Механические характеристики двигателя при частотном управлении по закону  $U/f_1 = \text{const}$

Третий способ регулирования скорости вращения АД состоит в том, что во время работы двигателя в цепь обмотки ротора вводят сопротивление регулировочного реостата. На рис. 3.11.29.3 приведены механические характеристики АД, из которых следует, что с увеличением активного сопротивления цепи ротора возрастает величина скольжения  $S$ , соответствующая заданному значению момента  $M$  ( $M_{\text{вр.}} = M_c$ ). Следовательно, скорость вращения ротора  $n_2$  снижается. Такой способ регулирования применим только для АД с фазным ротором.

В 2-скоростных АД на синхронные скорости, отличающиеся в 2 раза, каждая фаза статора допускает переключение катушек с последовательного соединения на параллельное. Переключение обмоток статора со звезды на двойную звезду дает при высшей скорости почти двойную мощность, но прежний номинальный момент. Переключение с треугольника на двойную звезду обеспечивает неизменную номинальную мощность при обеих скоростях и почти двойной номинальный момент на низшей скорости. При переключении обмоток статора с меньшего числа полюсов на большее АД автоматически переходит в генераторный режим с отдачей активной энергии в сеть, а затем в двигательный режим с соответствующей меньшей скоростью.

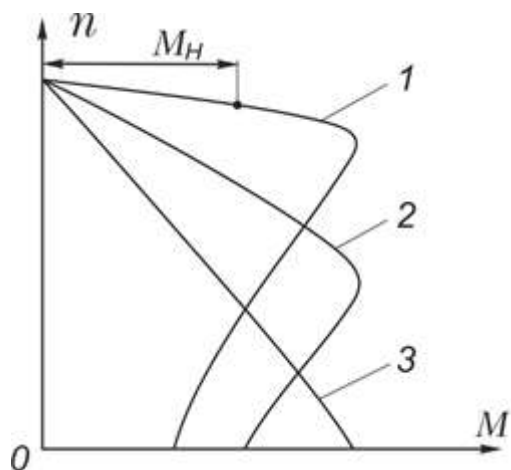


Рис. 3.11.29.3. Естественная (1) и реостатные (2, 3) механические характеристики

Всякое изменение частоты тока приводит к переходу АД на новую механическую характеристику. Для обеспечения высокой жесткости механических характеристик АД и достаточной перегрузочной способности нужно одновременно с частотой тока регулировать величину напряжения  $U$  так, чтобы магнитный поток  $\Phi$ , пропорциональный отношению  $U/f$ , оставался постоянным.

Наибольшее применение из каскадных схем регулирования скорости вращения АД получила схема асинхронного вентильного каскада АВК – рис. 3.11.29.4.

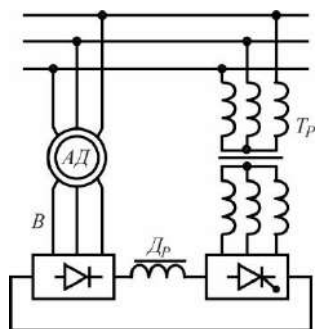


Рис. 3.11.29.4. Схема асинхронного вентильного каскада

Изменяя противо-ЭДС инвертора, меняем ток в цепи ротора, а также момент и скорость АД [51].

### 3.11.30. Расчет пусковых сопротивлений АД с фазным ротором

Расчет пусковых сопротивлений производится двумя способами: графическим и аналитическим. Графический метод расчета основан на пря-

молинейности механических характеристик. Ниже приводится расчет пусковых сопротивлений аналитическим методом (рис. 3.11.30.1).

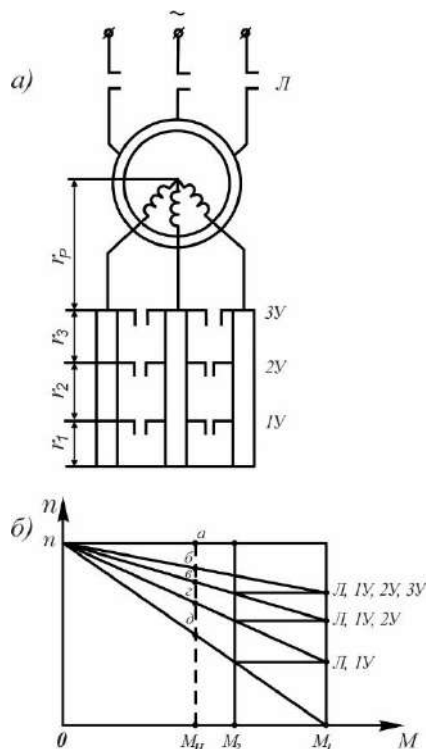


Рис. 3.11.30.1. К расчету пусковых сопротивлений

**Пример 3.11.30.1.**  $P_2 = 25$  кВт;  $n_2 = 732$  об/мин;  $I_{2H} = 60$  А;  $E_{2H} = 190$  В;  $M_H = 33,3$  кНм;  $n_1 = 750$  об/мин;  $M_c = 31,5$  кГм. Режим пуска форсированный.

### Решение

1. Принимаем пусковой реостат, состоящий из трех ступеней сопротивления.

2. Номинальное скольжение электродвигателя:

$$s_H = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 = \frac{750 - 732}{750} \cdot 100 = 2,4 \%$$

3. Отношение максимального пускового момента к переключающему:

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{10000}{s_H \% \cdot M_1 \%}} = \sqrt[3]{\frac{10000}{2,4 \cdot 200}} = 2,73,$$

если принять  $M_1 \% = 200$  % от  $M_H$ .

4. Номинальное сопротивление ротора:

$$R_{2H} = \frac{E_{2H}}{1,73 I_{2H}} = \frac{190}{1,73 \cdot 60} = 1,8 \text{ Ом.}$$

5. Внутреннее активное сопротивление ротора:

$$r_p = S_H \cdot \frac{R_{2H}}{100} = 2,4 \cdot \frac{1,8}{100} = 0,043 \text{ Ом.}$$

6. Сопротивление отдельных секций на фазу:

$$r_3 = r_p(\lambda - 1) = 0,043(2,73 - 1) = 0,074 \text{ Ом;}$$

$$r_2 = r_{3\lambda} = 0,074 \cdot 2,73 = 0,202 \text{ Ом;}$$

$$r_1 = r_{2\lambda} = 0,202 \cdot 2,73 = 0,55 \text{ Ом.}$$

### 3.11.31. Определение начала и конца обмоток

Мегомметром или контрольной лампой определяем принадлежность выводов обмотки отдельным фазам, т.е. определяем условно «начало» и «конец» обмоток.

#### Первый способ (6 выводов)

1. Присоединяем к условным «н» и «к» обмотки (+) и (-) батареи через выключатель В.

2. При отключении выключателя В на других фазах будет (+) на «началах» и (-) на «концах» (по направлению отклонения стрелки милливольтметра).

3. При включении тока полярность на других фазах будет обратной указанному (рис. 3.11.31.1).

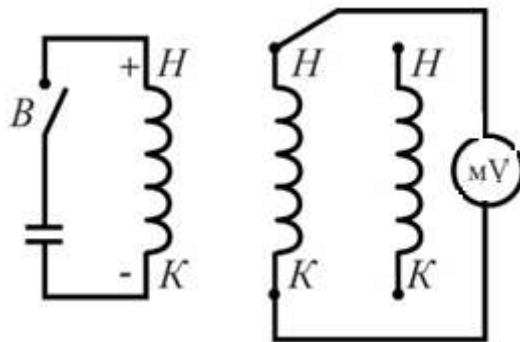


Рис. 3.11.31.1. Определение начала и конца обмоток (первый способ)

#### Второй способ (3 вывода)

Два вывода питают переменным током пониженного напряжения ( $U_{12} \leq 0,2U_H$ ) и вольтметром измеряют  $U_{31}$  и  $U_{32}$ .

При правильном соединении  $U_{31} = U_{32} = 0,5U_{12}$ .

Опыт производим 3 раза, подводя напряжение к различной паре выводов. Если одна из фаз перевернута, то при двух опытах из трех напряжения между третьим выводом и каждым из двух других будут неодинаковы (рис. 3.11.31.2).

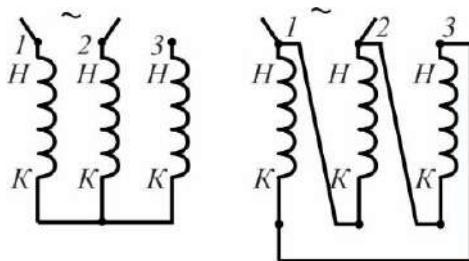


Рис. 3.11.31.2. Определение начала и конца обмоток (второй способ)

В случае фазного ротора его обмотка должна быть разомкнута [8].

### 3.11.32. Определение параметров АД при отсутствии паспорта

В практике эксплуатации АД встречаются случаи, когда щиток с номинальными данными утерян или испорчен. Тогда для восстановления приближенных данных могут быть использованы коэффициенты, кривые и таблицы [6, 27, 28].

#### 3.11.32.1. Определение номинальной мощности на валу

Мощность  $P_{2H}$  определяем ориентировочно путем измерения омического сопротивления фазы статора:

$$I_{\phi} R_{\phi} = k U_{\phi}, I_{\phi} = \frac{k U_{\phi}}{R_{\phi}}.$$

Мощность двигателя определяются:

$$P_{2H} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \eta_H \cos \varphi_{1H},$$

где  $U_{\phi} = U_L$  – при соединении в треугольник,  $U_{\phi} = U_L / \sqrt{3}$  при соединении звездой,

$k, \eta_H, \cos \varphi_{1H}$  – взяты из табл. 3.11.32.1.1.

Таблица 3.11.32.1.1

Зависимость параметров  $k, \eta_H, \cos \varphi_{1H}$  от мощности

| Мощность $P_{2H}$ , кВт | $k$  | $\cos \varphi_{1H}$ | $\eta_H$ | $\eta_H \cos \varphi_{1H}$ |
|-------------------------|------|---------------------|----------|----------------------------|
| 0,1                     | 0,11 | 0,66                | 0,65     | 0,43                       |
| 1                       | 0,06 | 0,77                | 0,75     | 0,57                       |
| 7,5                     | 0,04 | 0,85                | 0,82     | 0,7                        |
| 25                      | 0,03 | 0,89                | 0,88     | 0,78                       |
| 100                     | 0,02 | 0,9                 | 0,92     | 0,83                       |

Порядок мощности двигателя определяется визуально. Полученная по формуле мощность  $P_{2H}$  должна быть проверена путем проведения теплового режима.

**Пример 3.11.32.1.1.** Фазное напряжение  $U_{\phi} = 220$  В, омическое сопротивление фазы статора  $R_{\phi} = 0,72$  Ом, порядок мощности 7,5 кВт. Определить мощность на валу  $P_{2H}$ .

**Решение**

Из табл. 3.11.32.1.1 коэффициент  $k = 0,04$ ,  $\eta_H \cdot \cos\varphi_{1H} = 0,7$ .

Ток в фазе определится:

$$I_{\phi} = \frac{kU_{\phi}}{R_{\phi}} = \frac{0,04 \cdot 220}{0,72} = 12,2 \text{ А.}$$

Примерная мощность двигателя:

$$P_2 = 3U_{\phi}I_{\phi}\eta_H\cos\varphi_{1H} = 3 \cdot 0,22 \cdot 12,2 \cdot 0,7 = 5,63 \text{ кВт.}$$

Ближайший серийный электродвигатель имеет  $P_{2H} = 5,5$  кВт.

### 3.11.32.2. Определение номинальных нагрузок, потребляемых из сети

Для расчета номинальных параметров АД требуется знание коэффициентов мощности  $\cos\varphi_{1H}$  и полезного действия  $\eta_H$ . При отсутствии паспорта или каталога средние значения  $\cos\varphi_{1H}$  и  $\eta_H$  для двигателей основного исполнения (4А, АИ, АИР и др.) принимаются согласно табл. 3.11.32.2.1 [45, 28].

Таблица 3.11.32.2.1

Зависимость  $\cos\varphi_{1H}$  и  $\eta_H$  от мощности на валу

| Параметр                      | Мощность на валу $P_{2H}$ , кВт |      |      |      |      |     |      |      |      |      |
|-------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|
|                               | 1,1                             | 2,2  | 5,5  | 11   | 22   | 37  | 55   | 110  | 200  | 315  |
| $\eta_H(\text{ср})$           | 0,75                            | 0,8  | 0,83 | 0,86 | 0,89 | 0,9 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,94 |
| $\cos\varphi_{1H}(\text{ср})$ | 0,8                             | 0,83 | 0,85 | 0,87 | 0,9  | 0,9 | 0,9  | 0,9  | 0,91 | 0,92 |

Зная  $P_{2H}$ ,  $\eta_H$  и  $\cos\varphi_{1H}$ , можно определить номинальные мощности и токовую нагрузку, потребляемые из сети, а также потери активной мощности в двигателе:  $P_{1H}$ ,  $Q_{1H}$ ,  $S_{1H}$ ,  $I_{1H}$ ,  $\Delta P_H$ .

**Пример 3.11.32.1.2.** Асинхронный двигатель имеет технические данные [45]:

$$P_{2H} = 55 \text{ кВт, } n_c = 1500 \text{ об/мин, } U_{1H} = 0,38 \text{ кВ,}$$

$$\eta_H = 0,91, \cos\varphi_{1H} = 0,9.$$

Определить номинальные параметры, а также параметры холостого хода и произвольной нагрузки при  $k_3 = 0,7$ , приведенные потери активной мощности и приведенный КПД.

### Решение

Номинальный режим

1. Номинальная активная мощность, потребляемая из сети:

$$P_{1н} = P_{2н}/\eta_n = 55/0,91 = 60,4 \text{ кВт.}$$

2. Номинальная реактивная мощность:

$$Q_{1н} = P_{1н} \operatorname{tg} \varphi_{1н} = 60,4 \cdot 0,4834 = 29,2 \text{ кВАр.}$$

3. Номинальная полная мощность:

$$S_{1н} = P_{2н}/\eta_n \cos \varphi_{1н} = 55/0,91 \cdot 0,9 = 67,1 \text{ кВА.}$$

4. Номинальный ток статора:

$$I_{1н} = S_{1н}/\sqrt{3}U_{1н} = 67,1/1,73 \cdot 0,38 = 102 \text{ А.}$$

5. Номинальные потери активной мощности в двигателе:

$$\Delta P_n = P_{1н} - P_{2н} = 60,4 - 55 = 5,4 \text{ кВт.}$$

Холостой ход

6. Активная мощность холостого хода:

$$P_0 = k_0 \Delta P_n = 0,4 \cdot 5,4 = 2,16 \text{ кВт,}$$

(для двигателей средней и большой мощности  $k_0 = 0,4$  [40]).

7. Реактивная мощность холостого хода:

$Q_0 = Q_{1н}/1,47 = 29,2/1,47 = 19,8$  кВАр (для диапазона изменений  $\cos \varphi_{1н} = 0,8 \div 0,9$  отношение  $Q_{1н}/Q_0 = 1,47$ ), [28].

8. Ток холостого хода:

$$I_0 = Q_0/\sqrt{3}U_0 = 19,8/1,73 \cdot 0,38 = 30 \text{ А.}$$

9. Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0 I_0} = \frac{2,16}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 30} \approx 0,11.$$

Оптимальный коэффициент загрузки

10. Коэффициент загрузки, при котором  $\eta = \eta_{max}$ :

$$k_{3.опт.} = \sqrt{\gamma} = \sqrt{\frac{P_0}{\Delta P_n - P_0}} = \sqrt{\frac{2,16}{5,4 - 2,16}} = 0,81.$$

Произвольный режим ( $k_3 = 0,7$ ).

11. Активная мощность на валу:

$$P_2 = P_{2н} \cdot k_3 = 55 \cdot 0,7 = 38,5 \text{ кВт.}$$

12. Активная мощность, потребляемая из сети:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{\text{д}} = P_2 + P_0 + P_k K_3^2 = P_2 + P_0 + (\Delta P_{\text{н}} - P_0) K_3^2 = \\ = 38,5 + 2,16 + (5,4 - 2,16) 0,5 = 42,28 \text{ кВт.}$$

13. Реактивная мощность, потребляемая из сети:

$$Q_1 = Q_0 + \Delta Q_{\text{н}} K_3^2 = Q_0 + (Q_{\text{н}} - Q_0) K_3^2 = 19,8 + (29,2 - 19,8) \cdot 0,5 = \\ = 24,5 \text{ кВАр.}$$

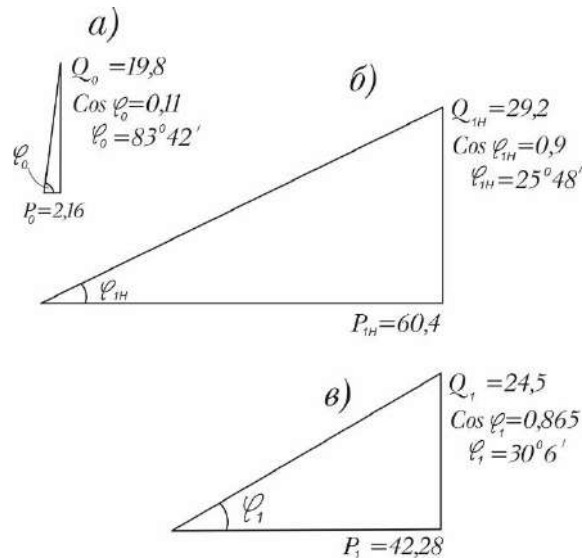


Рис. 3.11.32.2.1. Треугольники мощностей режимов

14. Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{38,5}{42,28} = 0,91.$$

15. Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_1}{P_1}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{24,5}{42,28}\right)^2}} = 0,865.$$

16. Ток, потребляемый из сети:

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 \cos \varphi_1} = \frac{42,28}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,865} = 74 \text{ А.}$$

17. Приведенные активные потери:

$$\Delta P_{\text{прив.}} = \Delta P_{\text{д}} + k_3 Q_1 = P_0 + P_k K_3^2 + k_3 Q_1 = 2,16 + (5,4 - 2,16) \cdot 0,5 + \\ + 0,1 \cdot 24,5 = 6,23 \text{ кВт.}$$

18. Приведенный КПД:

$$\eta_{\text{прив.}} = \frac{P_{2\text{н}} k_3}{P_{2\text{н}} k_3 + \Delta P_{\text{прив.}}} = \frac{38,5}{38,5 + 6,23} = 0,86.$$

Треугольники потребляемых мощностей холостого хода, номинального и произвольного режимов приведены на рис. 3.11.32.2.1.

### 3.11.32.3. Определение параметров холостого хода

Опытное определение  $I_0$  весьма просто, если двигатель не смонтирован с рабочей машиной. В противном случае измеренный ток будет выше, чем  $I_0$ . При отсутствии каталога средние значения тока  $I_0$  (в долях от номинальных) принимаются по табл. 3.11.32.3.1 [6].

Мощность холостого хода  $P_0$  может быть найдена при известных  $P_{2H}$  и отношении  $P_0/P_{1H}$  согласно табл. 3.11.32.3.2 [28].

Таблица 3.11.32.3.1

Зависимость отношения токов  $I_0/I_{1H}$  от мощности

| $P_{2H}$ , кВт | $I_0/I_{1H}$                               |      |      |      |      |      |
|----------------|--|------|------|------|------|------|
|                | Синхронная скорость вращения, $n_0$ об/мин |      |      |      |      |      |
|                | 3000                                       | 1500 | 1000 | 750  | 600  | 500  |
| 0,1–0,5        | 0,55                                       | 0,7  | 0,80 | 0,90 | 0,95 | –    |
| 0,51–1         | 0,40                                       | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 0,85 | 0,90 |
| 1,1–5          | 0,35                                       | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 0,70 |
| 5,1–10         | 0,25                                       | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
| 10,1–25        | 0,20                                       | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 |
| 25,1–50        | 0,18                                       | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 |
| 50,1–100       | –  | 0,30 | 0,33 | 0,35 | 0,40 | 0,45 |

Таблица 3.11.32.3.2

Зависимость отношения мощностей  $\frac{P_0}{P_{1H}}$  и  $Q_0/Q_{1H}$  от мощности на валу

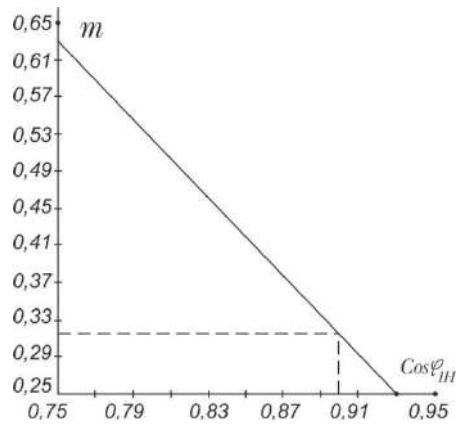
| Параметр             | $P_{2H}$ , кВт |      |      |      |      |       |      |       |      |       |
|----------------------|----------------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|
|                      | 1,1            | 2,2  | 5,5  | 11   | 22   | 37    | 55   | 110   | 200  | 315   |
| $\frac{P_0}{P_{1H}}$ | 0,11           | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,045 | 0,04 | 0,035 | 0,03 | 0,025 |
| $Q_0/Q_{1H}$         | 0,81           | 0,78 | 0,75 | 0,72 | 0,7  | 0,68  | 0,66 | 0,65  | 0,64 | 0,63  |

Реактивная мощность  $Q_0$  определяется по выражению [28]:

$$Q_0 = P_{1H} \cdot m, \text{ кВт},$$

где  $m$  – параметр, который находим благодаря зависимости  $m = f(\cos\varphi_{1H})$  (рис. 3.11.32.3.1).

$$P_{1H} = P_{2H}/\eta_H, \text{ кВт}.$$



$$m = \frac{I_0}{I_H \cos \varphi_{1H}} = \operatorname{tg} \varphi_H - \frac{1}{\frac{K_I}{\cos \varphi_{1H} \cdot \sin \varphi_{II}} - \operatorname{tg} \varphi_H} ;$$

Рис. 3.11.32.3.1. Зависимость  $m = f(\cos \varphi_{1H})$

**Пример 3.11.32.3.1.**  $P_{1H} = 60,4$  кВт,  $\cos \varphi_{1H} = 0,9$ ,  $I_{1H} = 102$ а. Определить  $Q_0$ ,  $I_0$ .

**Решение**

1.  $Q_0 = P_{1H} \cdot m = 60,4 \cdot 0,32 = 19,33$  кВАр,  $m = 0,32$  (рис. 3.11.32.3.1).

2. Ориентировочно  $I_0 = 0,3 \cdot 102 = 30$ а (по табл. 3.11.32.3.1  $I_0/I_{1H} = 0,3$ ).

Более точно:  $I_0 = Q_0/\sqrt{3}U_0 = 19,33/0,66 = 29,3$  А.

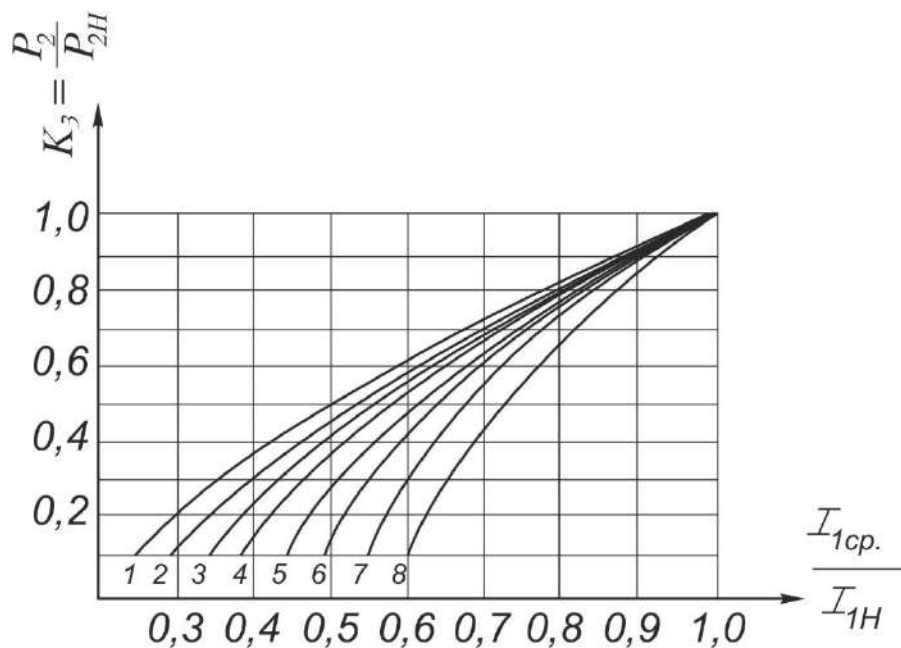


Рис. 3.11.32.3.2. Кривые для определения  $K_3$  при различных значениях  $\cos \varphi_{1H}$ : 1 –  $\cos \varphi_{1H} = 0,92$ ; 2 – 0,89; 3 – 0,86; 4 – 0,83; 5 – 0,79; 6 – 0,76; 7 – 0,73; 8 – 0,69

### 3.11.32.4. Определение параметров при произвольной нагрузке

По известному коэффициенту загрузки  $K_3$  (произвольная нагрузка) определим параметры АД по формулам:

$$P_1 = P_{2H} K_3 + \Delta P_d;$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{I}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_1}{P_1}\right)^2}};$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_d}{P_{2H} K_3}};$$

$$I_1 = \frac{P_2 / \eta}{\sqrt{3} U_{1H} \cdot \cos \varphi_1};$$

$$n_2 = n_c (1 - K_3 S_H).$$

Кривые на рис. 3.11.32.4.1 и на рис. 3.11.32.3.4.2 показывают изменение КПД и коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  двигателей серии 4А с синхронными угловыми скоростями от 314 до 78,5 рад/с при изменении мощности на их валу [55]. Рис. 3.11.32.4.1 соответствуют двигателям с  $\eta_{ном} = 0,63; 0,7; 0,77; 0,85; 0,93$ ; рис. 3.11.32.4.2 – с  $\cos \varphi_{1H} = 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ .

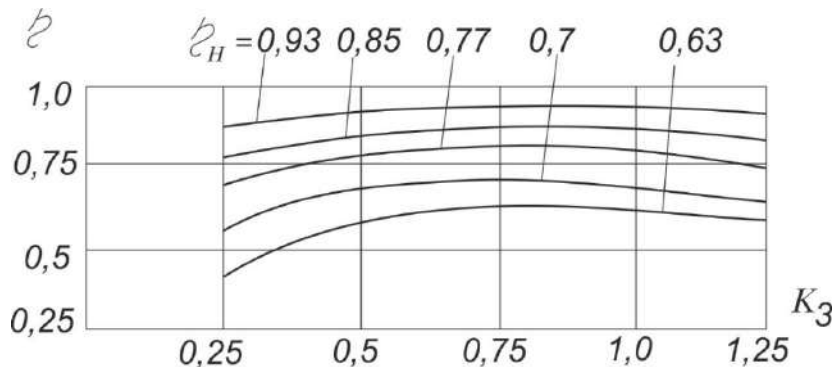


Рис. 3.11.32.4.1. Значения  $\eta$  при различных  $K_3$

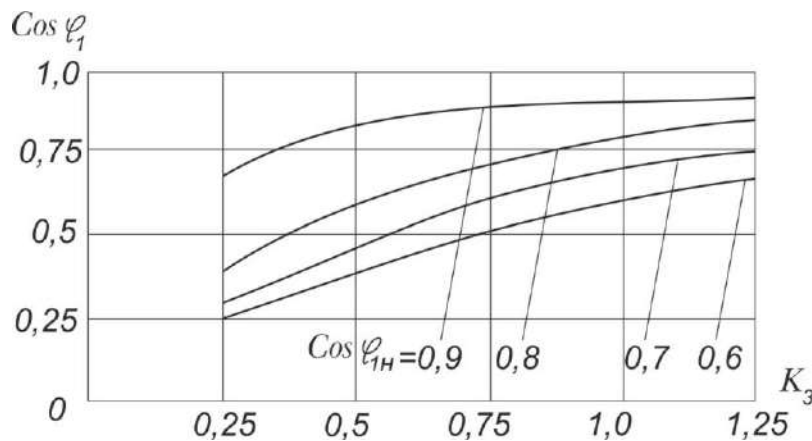


Рис. 3.11.32.4.2. Значения  $\cos \varphi_1$  при различных  $K_3$

При отсутствии паспорта номинальные ток статора  $I_{1н}$  и мощность на валу  $P_{2н}$  определяются через коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  [27]:

$$I_{1н} = K_1 I_0, \quad K_1 = \frac{I_{1н}}{I_0} = \frac{1}{K_0}, \quad P_{2н} = K_2 I_0,$$

$$K_2 = \frac{P_{2н}}{I_0} = \frac{\sqrt{3} U_1 I_{1н} \eta_n \cos \varphi_n}{I_0},$$

где  $I_0$  – ток холостого хода, А (при отсутствии каталогов может быть определен по амперметру или токоизмерительными клещами);

$K_0$  – коэффициент, определяемый по средним значениям  $I_0$  (синхронная скорость  $n_0$  – по тахометру);

$U_1$  – напряжения, подводимое к электродвигателю, 380 В;

$\eta_n, \cos \varphi_n$  – номинальные значения КПД и коэффициента мощности в зависимости от порядка мощности и скорости вращения электродвигателя.

Номинальный ток статора  $I_{1н}$  при известных  $P_{2н}$  и  $n_0$  определится через коэффициент  $K_3$ :

$$I_{1н} = K_3 P_{2н},$$

где  $K_3 = \frac{K_1}{K_2} = \frac{I_{1н}}{I_0} \cdot \frac{I_0}{P_{2н}} = \frac{I_{1н}}{P_{2н}}$ .

При эксплуатации электрохозяйства иногда (чаще всего при подсчете экономии электроэнергии) необходимо знать мощность холостого хода  $P_0$  асинхронного двигателя.

Мощность  $P_0$  определится через коэффициент  $K_4$ :

$$P_0 = K_4 I_0,$$

где

$$K_4 = \frac{P_0}{I_0} = \frac{\sqrt{3} U_1 I_0 \cos \varphi_0}{I_0} = 0,66 \cos \varphi_0.$$

В табл. 3.11.32.4.1 приведены значения коэффициентов  $K_1, K_2$  (в числителе) и  $K_3$  и  $K_4$  (в знаменателе).

Данная таблица позволяет при отсутствии паспорта определить номинальные параметры асинхронных двигателей, за исключением крановых, с помощью коэффициентов.

**Пример 3.11.32.4.1.** Ток  $I_0 = 4,8$  А,  $n_0 = 1500$  об/мин, интервал мощности 5,1–10 кВт. Определить  $I_{1н}, P_{2н}$ .

**Решение:**

$$I_{1н} = 2,22 \cdot 4,8 = 10,65 \text{ А}, \quad P_{2н} = 1,11 \cdot 4,8 = 5,33 \text{ кВт}.$$

Принимается  $P_{2н} = 5,5$  кВт.

**Пример 3.11.32.4.2.**  $I_0 = 12$  А,  $n_0 = 1000$  об/мин, порядок мощности 10,1–25 кВт.

Определить:  $I_{1H}$ ,  $P_{2H}$ ,  $P_0$ .

**Решение:**

$$I_{1H} = 26,6 \text{ А}; P_{2H} = 13,3 \text{ кВт}, P_0 = 1,92 \text{ кВт} \approx 2,0 \text{ кВт}.$$

Таблица 3.11.32.4.1

Значения коэффициентов  $K_1$ – $K_4$   
для определения номинальных параметров АД

| $P_{2H}$ | Значение $K_1 - K_4$ при различных $n_0$ , об/мин |            |            |            |            |            |
|----------|---|------------|------------|------------|------------|------------|
|          | 3000  | 1500       | 1000       | 750        | 600        | 500        |
| 0,1–0,5  | 1,82; 0,71  | 1,43; 0,41 | 1,25; 0,32 | 1,11; 0,28 | 1,05; 0,24 | –          |
|          | 2,6; 0,13   | 3,45; 0,09 | 3,9; 0,07  | 4,0; 0,07  | 4,3; 0,07  |            |
| 0,51–1,0 | 2,5; 1,07   | 1,82; 0,71 | 1,67; 0,55 | 1,54; 0,43 | 1,18; 0,32 | 1,11; 0,29 |
|          | 2,3; 0,14   | 2,6; 0,13  | 3,05; 0,07 | 3,6; 0,07  | 3,7; 0,07  | 3,9; 0,07  |
| 1,1–5,0  | 2,86; 1,37  | 2,0; 0,88  | 1,82; 0,73 | 1,67; 0,62 | 1,54; 0,55 | 1,43; 0,44 |
|          | 2,1; 0,16   | 2,25; 0,13 | 2,5; 0,1   | 2,7; 0,08  | 2,8; 0,07  | 3,2; 0,07  |
| 5,1–10   | 4; 2,6  | 2,22; 1,11 | 2,0; 0,94  | 1,82; 0,78 | 1,67; 0,67 | 1,54; 0,55 |
|          | 2,0; 0,16   | 2,0; 0,15  | 2,15; 0,13 | 2,3; 0,12  | 2,5; 0,11  | 2,8; 0,11  |
| 10,1–25  | 5; 2,65   | 2,5; 1,27  | 2,22; 1,11 | 2; 0,88    | 1,82; 0,78 | 1,67; 0,67 |
|          | 1,9; 0,16   | 1,95; 0,16 | 2,0; 0,16  | 2,25; 0,14 | 2,3; 0,1   | 2,5; 0,1   |
| 25,1–50  | 5,55; 3,0   | 2,86; 1,52 | 2,5; 1,27  | 2,22; 1,07 | 2,0; 0,94  | 1,82; 0,8  |
|          | 1,85; 0,16  | 1,9; 0,16  | 1,95; 0,16 | 2,1; 0,15  | 2,15; 0,13 | 2,25; 0,13 |
| 50–100   | –   | 4,0; 2,16  | 3,33; 1,76 | 2,86; 1,43 | 2,5; 1,22  | 2,22; 1,02 |
|          |   | 1,85; 0,17 | 1,9; 0,17  | 2,0; 0,16  | 2,05; 0,15 | 2,2; 0,15  |

### 3.11.33. Определение коэффициента загрузки АД методом амперметра

Для улучшения использования АД и приближения их нагрузочных режимов к наиболее выгодным необходимо знать фактические коэффициенты загрузки  $K_3$ . Для нахождения  $K_3$  не требуется проведения полных испытаний АД.

Способ амперметра. Нагрузка на валу определяется по показаниям амперметра. Во время работы машины определяется средний расчетный ток нагрузки  $I_{1cp}$ , затем, зная номинальный (паспортный) ток  $I_{1H}$  и номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{1H}$ , находится по кривым  $K_3$  двигателя (рис. 3.11.32.4.2) или табл. 3.11.33.1.

Таблица 3.11.33.1

К определению отношения токов

| $K_3 = \frac{P_2}{P_{2H}}$ | $\frac{I_1}{I_{1H}}$ при $\cos \varphi_H$ |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|
|                            | 0,92                                      | 0,89 | 0,86 | 0,83 | 0,79 | 0,76 | 0,73 | 0,69 |
| 0                          | 0,20                                      | 0,25 | 0,32 | 0,37 | 0,44 | 0,48 | 0,54 | 0,58 |
| 0,1                        | 0,24                                      | 0,29 | 0,34 | 0,39 | 0,45 | 0,49 | 0,55 | 0,59 |
| 0,2                        | 0,3                                       | 0,34 | 0,38 | 0,43 | 0,47 | 0,52 | 0,57 | 0,62 |
| 0,3                        | 0,35                                      | 0,4  | 0,43 | 0,47 | 0,51 | 0,55 | 0,59 | 0,65 |
| 0,4                        | 0,43                                      | 0,47 | 0,5  | 0,53 | 0,56 | 0,59 | 0,64 | 0,69 |
| 0,5                        | 0,5                                       | 0,54 | 0,57 | 0,59 | 0,62 | 0,64 | 0,68 | 0,72 |
| 0,6                        | 0,59                                      | 0,62 | 0,64 | 0,66 | 0,68 | 0,70 | 0,74 | 0,77 |
| 0,7                        | 0,69                                      | 0,7  | 0,72 | 0,74 | 0,75 | 0,77 | 0,79 | 0,82 |
| 0,8                        | 0,77                                      | 0,79 | 0,81 | 0,82 | 0,83 | 0,85 | 0,86 | 0,88 |
| 0,9                        | 0,87                                      | 0,88 | 0,89 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,94 |
| 1,0                        | 1,0                                       | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  |

**Пример 3.11.33.1.** Асинхронный электродвигатель имеет параметры  $P_{2H} = 15$  кВт,  $I_{1H} = 28$  А,  $\cos \varphi_H = 0,86$ . Определить коэффициент загрузки АД, если ток статора.

а)  $I_1 = 12$  А; б)  $I_1 = 16$  А; в)  $I_1 = 25$  А.

**Решение**

$I_1 / I_{1H}$  – определится:

а)  $12/28 = 0,43$ ;

б)  $16/28 = 0,53$ ;

в)  $25/28 = 0,89$ .

Коэффициент загрузки  $K_3$  по табл. 3.11.33.1 соответственно 0,3; 0,44; 0,9.

### 3.11.34. Пересчет обмоток

#### А. На новое напряжение

$$\Phi R_M = I \mathcal{W} = const,$$

тогда:

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}};$$

$$\mathcal{W}_2 = \mathcal{W}_1 \frac{U_2}{U_1}.$$

Перемотка сгоревших катушек проводом другого сечения приведет к перегреву аппарата.

Если  $d_2 > d_1$ , то магнитный поток  $\Phi \equiv \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$ , и поэтому увеличиваются потери в стали.

Если  $d_2 < d_1$ , то плотность тока  $j_2 = j_1 \frac{d_1^2 w_1}{d_2^2 w_2}$ , и увеличиваются потери в меди.

### **Б. На новую частоту сети**

Число эффективных проводников в пазу изменяется обратно пропорционально частоте:

$$N_2 = N_1 \frac{f_1}{f_2}.$$

Сечение и диаметр провода:

$$S_2 = S_1 \frac{N_1}{N_2}; d_2 = d_1 \sqrt{\frac{N_1}{N_2}} = d_1 \sqrt{\frac{f_2}{f_1}}.$$

Мощность при новой частоте:

$$P_2 = P_1 \frac{f_2}{f_1}.$$

Частота вращения ротора:

$$n_2 = n_1 \frac{f_2}{f_1}.$$

В случае значительного повышения частоты (с 50 на 200–400 Гц) мощность, подсчитанная по формуле, должна быть уменьшена на 15–35 % из-за увеличения потерь в меди и в стали сердечника.

### **В. Замена медных обмоточных проводов алюминиевыми**

Так как  $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{0,028}{0,017} = 1,65$ , то при сохранении сечения провода номинальный ток должен быть снижен на 22 % для сохранения потерь энергии в обмотке и на нагрев:

$$d_2 = 1,28d_1, \quad d_1 = 0,78d_2.$$

Алюминиевая обмотка в АД примерно в 2 раза легче и на 20–40 % дешевле медной. Однако КПД у двигателя с алюминиевой обмоткой ниже, что вызывает перерасход электроэнергии.

### **Г. Замена круглого обмоточного провода двумя проводами**

При отсутствии провода нужного диаметра его можно заменить двумя проводами. Суммарное их сечение должно быть равно или несколько больше сечения заменяемого провода:

$$S_{\Sigma} = S_1 + S_2.$$

Допустимо также небольшое (на 2–3 %) уменьшение сечения без понижения мощности двигателя.

### **Д. На новую частоту вращения**

Для изменения частоты вращения двигателя необходимо изменить число полюсов обмотки статора  $p_1$  на  $p_2$  и шаг обмотки. При фазном рото-

ре следует изменить числа полюсов и в его обмотке. Короткозамкнутые роторы остаются без изменений.

Диаметр провода:

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{n_1}{n_2}},$$

где  $n_1, n_2$  – число проводников в пазу до и после перемотки.

Мощность двигателя после перемотки:

$$P_2 \approx P_1 \frac{p_1}{p_2}.$$

### 3.11.35. Несимметричные режимы работы АД

#### 3.11.35.1. Обрыв одной фазы сети при изолированной нейтрали обмотки статора АД, соединенного звездой

Токи в фазах:  $I_A = 0$ ;  $I_B = -I_C$  (рис. 3.11.35.1.1). Ток двигателя при скольжении  $s = 1$  (неподвижный ротор) и обрыве одной фазы цепи статора:  $I_1 = 0,86 \cdot I_{\text{пуск}}$ .

При холостом ходе ( $s \approx 0$ ) практически  $I_0$  при обрыве одной фазы статора примерно в  $\sqrt{3}$  больше, чем  $I_0$  при нормальной работе [46].

Вращающийся момент двигателя при скольжении  $s = 1$  равен  $M_{\text{вр.}} = 0$ , и пуск двигателя невозможен. Для того чтобы двигатель развернулся, ему необходим хотя бы кратковременный толчок. Если под воздействием этого толчка двигатель приобретает такую скорость, при которой его  $M_{\text{вр.}} > M_c$ , то он может развернуться.

При неподвижном двигателе вольтметр, включенный на выводах двигателя между оборванной фазой и одной из включенных фаз, покажет 0,5 линейного напряжения. Если  $U_{\text{л}} = 380$  В, то  $U_{\text{AB}} = U_{\text{AC}} = 190$  В.

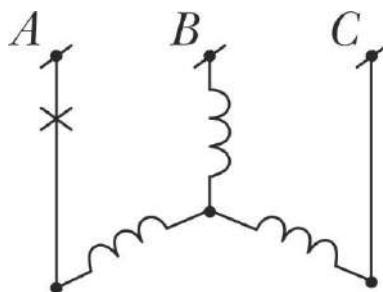


Рис. 3.11.35.1.1. Обрыв одной фазы сети при изолированной нейтрали и соединении в звезду

Кратность максимального момента и критическое скольжение ( $\frac{M_{\text{кр.}}}{M_{\text{н}}}$  и  $S_k$ ) двигателя при обрыве одной фазы цепи статора примерно в 2 раза меньше, чем соответствующие значения при нормальном режиме.

### 3.11.35.2. Обрыв одного из линейных проводов при соединении обмотки статора треугольником

Обрыв одного из линейных проводов при соединении обмотки статора треугольником представлен на рис. 3.11.35.1.2.

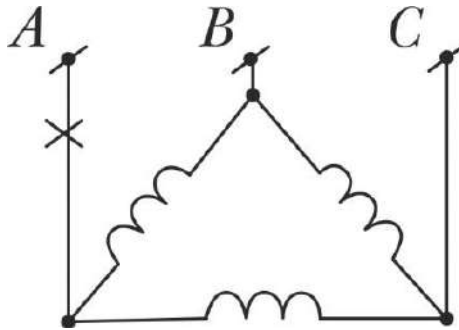


Рис. 3.11.35.1.2. Обрыв одной фазы сети при изолированной нейтрали и соединении в треугольник

При отсутствии обрыва одного линейного провода токи в фазах обмотки статора меньше линейного тока в  $\sqrt{3}$ ,  $I_{л}/I_{ф} = \sqrt{3}$ . При обрыве провода ток в одной из фаз обмотки статора больше в  $2/\sqrt{3} = 1,15$  раза, а в двух других – меньше в  $1/\sqrt{3} = 0,57$  раза по отношению к линейному току при обрыве одного линейного провода.

### 3.11.35.3. Обрыв фаз при соединении нулевых точек источника питания и обмотки статора двигателя

Ток в нулевом проводе меньше тока в фазе двигателя  $I_0=0,86I_1$ . Пусковой ток двигателя  $I_{п} = 0,875I_{п.ном.}$  (рис. 3.11.35.1.3).

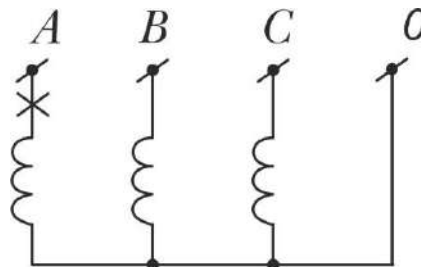


Рис. 3.11.35.1.3. Обрыв одной фазы сети при наличии нейтрали

При глухо заземлённой нейтрали двигателя возможна работа даже при обрыве двух фаз. Критическое скольжение  $S_K$  и максимальный момент  $M_K$

в 3,5 раза меньше по сравнению с нормальной работой двигателя. Ток холостого хода увеличится в 2,5 раза по сравнению с номинальным режимом.

Механическая характеристика при работе двигателя на  $3^x$  и на  $2^x$  фазах приведена на рис. 3.11.35.1.4.

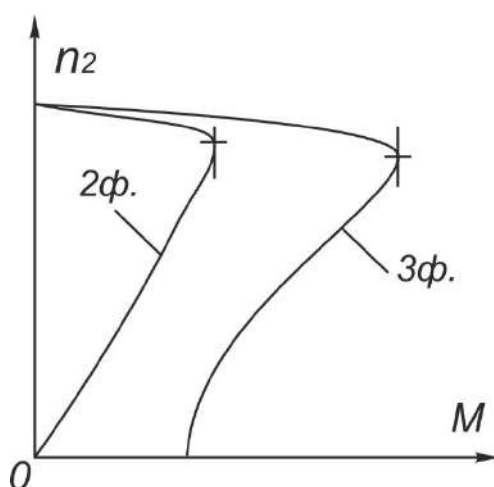


Рис. 3.11.35.1.4. Механическая характеристика двигателя при работе  $3^x$  и  $2^x$  фазах

### 3.11.36. Специальные режимы асинхронных машин

#### 3.11.36.1. Асинхронный генератор (АГ)

Асинхронная машина переходит в генераторный режим работы при вращении ротора с частотой вращения магнитного поля ( $n > n_1$ ). При этом машина отдает активную мощность  $P_1$  в сеть и потребляет из сети реактивную мощность  $Q_1$ , необходимую для образования вращающегося магнитного поля. Потребление из сети  $Q_1$  вызывает снижение гибкости работы энергосистемы и дополнительную нагрузку реактивным током параллельно включенных синхронных машин, что является основным недостатком АГ.

Изменение отдаваемой АГ мощности  $P_1$  осуществляется регулированием скорости вращения первичного двигателя. Частота генератора совпадает с частотой сети.

Кроме работы параллельно с сетью переменного тока возможна автономная работа АГ в режиме самовозбуждения (от потока остаточного магнетизма ротора). К выводам статора подключают конденсаторы, которые служат источником  $Q_1$  (рис. 3.11.36.1.1). При работе на активно-индуктивную нагрузку конденсаторы служат источником  $Q_1$  и для нагрузки.

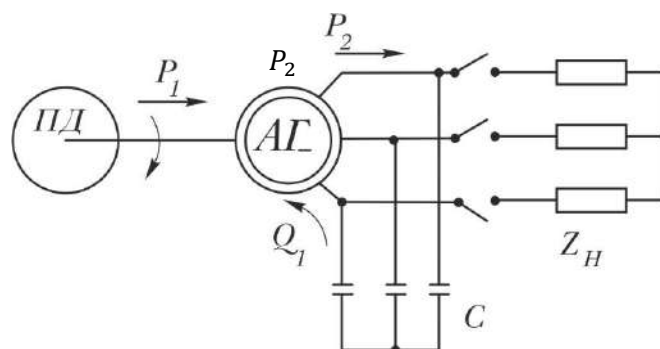


Рис. 3.11.36.1.1. Схема включения АГ при работе с самовозбуждением: ПД – приводной двигатель,  $Z_H$  – нагрузка, С – конденсаторы

### 3.11.36.2. Электромагнитный тормоз

Если ротор асинхронной машины вращать в сторону, противоположную направлению электромагнитного момента, то величина скольжения  $s > 1$ . Такой режим называется тормозным. Он используется для торможения и остановки АД и приводимых механизмов.

Режим электромагнитного тормоза может быть создан изменением чередования фаз. При скорости вращения  $n_2 \approx 0$  машину необходимо отключить от сети, иначе ротор начнет вращаться в обратном направлении. В режиме тормоза машина обычно используется в диапазоне скольжения  $1 < s < 2$ .

### 3.11.36.3. Индукционный регулятор

Иногда специально выполненную асинхронную машину с фазным ротором используют для плавного регулирования напряжения сети переменного тока. В этом случае обмотку ротора соединяют через контактные кольца с обмоткой статора (рис. 3.11.36.1.2) по схеме автотрансформера. Начала обмоток статора и ротора присоединяют к первичной сети с напряжением  $U_1$ . Концы одной обмотки присоединяют к вторичной сети с напряжением  $U_2$ . Эту обмотку называют проходной. Концы другой обмотки соединяют в звезду или треугольник. Проходной может быть как статорная, так и роторная обмотка.

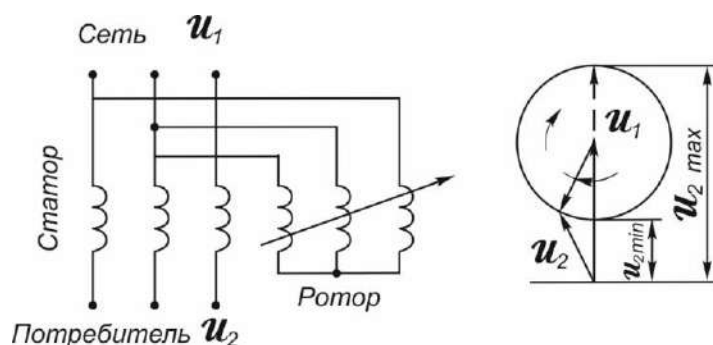


Рис. 3.11.36.1.2. Схема соединения обмоток и векторная диаграмма напряжения при подключении индукционного регулятора

### 3.11.37. Неисправности АД

Основные неисправности АД сведены в табл. 3.11.37.1.

Таблица 3.11.37.1

#### Основные неисправности и возможные причины

| № п/п | Неисправность                   | Причина  |
|-------|---------------------------------|--|
| 1     | Двигатель не идет в ход         | а) перегорание предохранителей;  |
|       |                                 | б) выключен автоматический выключатель;                                    |
|       |                                 | в) обрыв в одной фазе сети или в обмотке статора (при соединении звездой); |
|       |                                 | г) обрыв в двух (или в трех) фазах пускового реостата;                     |
|       |                                 | д) большая выработка вкладышей подшипников;                                |
|       |                                 | е) нагрузка при пуске велика;  |
|       |                                 | ж) неудачно выбрано число пазов статора и ротора.                          |
| 2     | Перегрев активной стали статора | а) напряжение сети выше номинального;                                      |
|       |                                 | б) недостаточная вентиляция;   |
|       |                                 | в) задевание ротора о статор;  |
|       |                                 | г) замыкание между отдельными листами активной стали.                      |
| 3     | Перегрев обмотки статора        | а) двигатель перегружен или нарушена его вентиляция;                       |
|       |                                 | б) напряжение ниже, номинального;  |
|       |                                 | в) обмотка статора соединена не Y, а Δ;                                    |
|       |                                 | г) межвитковые замыкания;  |
|       |                                 | д) «перевернуты» концы одной фазы.   |

### 3.12. Синхронные двигатели (СД)

#### 3.12.1. Общие сведения о синхронной машине

**Синхронная машина** – это электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой равна частоте вращения магнитного поля в воздушном зазоре.

##### Устройство

Основными частями синхронной машины являются якорь и индуктор (обмотка возбуждения) (рис. 3.12.1.1).

Якорь представляет собой одну или несколько обмоток переменного тока. В двигателях токи, подаваемые в якорь, создают вращающееся магнитное поле, которое сцепляется с полем индуктора, и таким образом происходит преобразование энергии. Поле якоря оказывает воздействие на

поле индуктора и называется поэтому также *полем реакции якоря*. В генераторах поле реакции якоря создается переменными токами, индуцируемыми в обмотке якоря от индуктора.

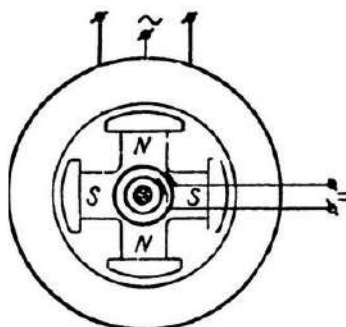


Рис. 3.12.1.1. Устройство синхронной машины

Индуктор состоит из полюсов – электромагнитов постоянного тока или постоянных магнитов (в микромашинах). Индукторы синхронных машин имеют две различные конструкции: явнополусную или неявнополусную. Явнополусная машина отличается тем, что полюса ярко выражены и имеют конструкцию, схожую с полюсами машины постоянного тока. При неявнополусной конструкции обмотка возбуждения укладывается в пазы сердечника индуктора, что весьма похоже на обмотку роторов асинхронных машин с фазным ротором, с той лишь разницей, что между полюсами оставляется место, не заполненное проводниками (так называемый *большой зуб*). Неявнополусные конструкции применяются в быстроходных машинах, чтобы уменьшить механическую нагрузку на полюса.

Для уменьшения магнитного сопротивления, то есть для улучшения прохождения магнитного потока, применяются ферромагнитные сердечники ротора и статора. В основном они представляют собой шихтованную (набранную из отдельных листов) конструкцию из электротехнической стали.

### Принцип действия

Как всякая электромашина, синхронная машина может работать в режимах двигателя и генератора (рис. 3.12.1.2).

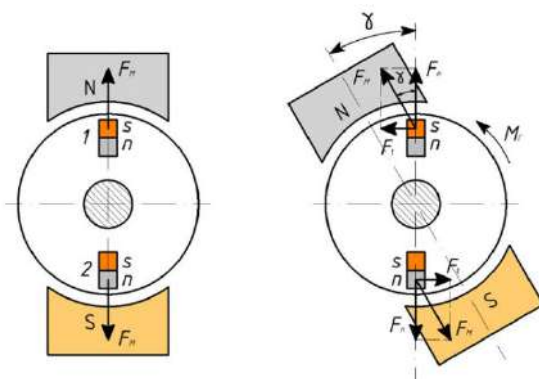


Рис. 3.12.1.2. Принцип действия синхронной машины

### **Двигательный режим**

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля якоря и магнитного поля полюсов индуктора. Обычно якорь расположен на статоре, а индуктор – на роторе. В мощных двигателях в качестве полюсов используются электромагниты (ток на ротор подаётся через скользящий контакт щётка – кольцо), в маломощных, к примеру, в двигателях жёстких дисков – постоянные магниты. Существует *обращённая* конструкция двигателей, в которой якорь расположен на роторе, а индуктор – на статоре (в устаревших двигателях, а также в современных криогенных синхронных машинах, в которых в обмотках возбуждения используются сверхпроводники).

**Запуск двигателя.** Двигатель требует разгона до частоты, близкой к частоте вращения магнитного поля в зазоре, прежде чем сможет работать в синхронном режиме. При такой скорости вращающееся магнитное поле якоря сцепляется с магнитными полями полюсов индуктора (если индуктор расположен на статоре, то получается, что вращающееся магнитное поле вращающегося якоря (ротора) неподвижно относительно постоянного поля индуктора (статора), если индуктор на роторе, то магнитное поле вращающихся полюсов индуктора (ротора) неподвижно относительно вращающегося магнитного поля якоря (статора) – это явление называется «вход в синхронизм».

Для разгона обычно используется асинхронный режим, при котором обмотки индуктора замыкаются через реостат или накоротко, как в асинхронной машине, для такого режима запуска в машинах на роторе делается короткозамкнутая обмотка, которая также выполняет роль успокоительной обмотки, устраняющей «раскачивание» ротора при синхронизации. После выхода на скорость, близкую к номинальной ( $> 95\%$  – так называемая подсинхронная скорость), индуктор запитывают постоянным током.

В двигателях с постоянными магнитами применяется внешний разгонный двигатель либо частотно-регулируемый пуск, также частотное регулирование применяют на всех типах СД в рабочем режиме – например, на тяговых двигателях скоростного электропоезда TGV. Иногда на валу крупных машин ставят небольшой генератор (постоянного тока или переменного тока с выпрямлением), т.н. «возбудитель», который питает электромагниты.

Синхронные двигатели при изменении возбуждения меняют коэффициент мощности с ёмкостного на индуктивный. Перевозбуждённые СД на холостом ходу применяют в качестве компенсаторов реактивной мощности. Синхронные двигатели в промышленности обычно применяют при единичных мощностях свыше 300 кВт (воздуходувки, водоперекачивающие и нефтеперекачивающие насосы), к примеру, типа СТД. При меньших мощностях обычно применяется более простой (и надёжный) асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

### **Генераторный режим**

Обычно синхронные генераторы выполняют с якорем, расположенным на статоре, для удобства отвода электрической энергии. Поскольку мощность возбуждения невелика по сравнению с мощностью, снимаемой с якоря (0,3–2 %), подвод постоянного тока к обмотке возбуждения с помощью двух контактных колец не вызывает особых затруднений. Принцип действия синхронного генератора основан на явлении электромагнитной индукции; при вращении ротора магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, сцепляется поочередно с каждой из фаз обмотки статора, индуцируя в них ЭДС. В наиболее распространенном случае применения трехфазной распределенной обмотки якоря в каждой из фаз, смещенных друг относительно друга на 120 градусов, индуцируется синусоидальная ЭДС. Соединяя фазы по стандартным схемам «треугольник» или «звезда», на выходе генератора получают трехфазное напряжение, являющееся общепринятым стандартом для магистральных электросетей.

### **3.12.2. Разновидности синхронных машин**

**Гидрогенератор** – явнополюсный синхронный генератор, предназначенный для выработки электрической энергии в работе от гидравлической турбины (при низких скоростях вращения 50–600 об/мин).

**Турбогенератор** – неявнополюсный синхронный генератор, предназначенный для выработки электрической энергии в работе от паровой или газовой турбины при высоких скоростях вращения ротора – 6000 (редко), 3000, 1500 об/мин.

**Синхронный компенсатор** – синхронный двигатель, предназначенный для выработки реактивной мощности, работающий без нагрузки на валу (в режиме холостого хода); при этом по обмотке якоря проходит практически только реактивный ток. Синхронный компенсатор может работать в режиме улучшения коэффициента мощности или в режиме стабилизации напряжения. Дает ёмкостную нагрузку.

**Машина двойного питания** (в частности АСМ) – синхронная машина с питанием обмоток ротора и статора токами разной частоты, за счёт чего создаются несинхронные режимы работы.

**Ударный генератор** – синхронный генератор (как правило, трёхфазного тока), предназначенный для кратковременной работы в режиме короткого замыкания (КЗ).

Также существуют безредукторные, шаговые, индукторные, гистерезисные, бесконтактные синхронные двигатели.

### **Бесконтактная синхронная машина**

В классической синхронной машине имеется слабое место – контактные кольца со щётками, изнашивающиеся быстрее других частей машины из-за электроэрозии и простого механического истирания. Кроме того, ис-

крение щёток может стать причиной взрыва. Поэтому сначала в авиации, а позже и в других областях (в частности, на автономных дизель-генераторах) получили распространение бесконтактные трёхмашинные синхронные генераторы. В корпусе такого агрегата размещены три машины – подвозбудитель, возбудитель и генератор, их роторы вращаются на общем валу. Подвозбудитель – синхронный генератор с возбуждением от вращающихся на роторе постоянных магнитов, его напряжение подаётся в блок управления генератором, где выпрямляется, регулируется и подаётся в обмотку статора возбудителя (синхронный генератор с обращенной конструкцией). Поле статора наводит в обмотке возбудителя ток, выпрямляемый размещённым на валу блоком вращающихся выпрямителей (БВВ) и идущий в обмотку возбуждения генератора. Генератор уже вырабатывает ток, идущий к потребителям.

Такая схема обеспечивает как отсутствие иных механических частей в двигателе, кроме подшипников, так и автономность работы генератора – всё время, пока генератор вращается, подвозбудитель даёт напряжение, которое может быть использовано для питания цепей управления генератором.

### 3.12.3. Влияние тока возбуждения на работу СД

В создании результирующего магнитного потока СД принимают участие как обмотка статора, так и обмотка ротора. Так же, как у трансформаторов и асинхронных двигателей, магнитный поток СД при постоянном напряжении ( $U_c = \text{const}$ ) остается практически постоянным. Поэтому при изменении тока возбуждения  $i_b$  ток статора  $I_1$  будет также изменяться.

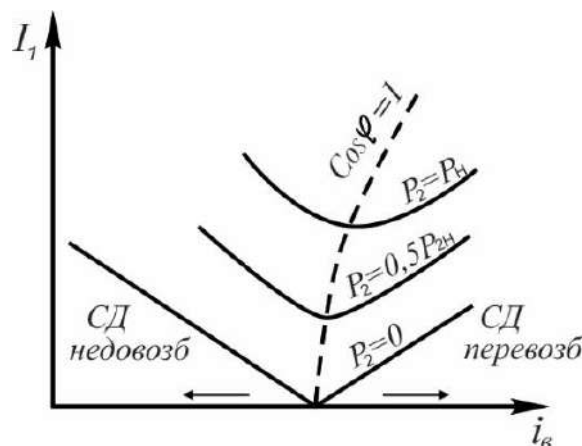


Рис. 3.12.3.1. V-образные характеристики СД

Зависимость  $I_1 = f(i_b)$  при постоянном вращающем моменте и постоянном напряжении выражается при помощи U-образных кривых (рис. 3.12.3.1).

Кривые показывают, что при определенной мощности на валу двигателя минимальная величина тока  $I_1$  будет при определенном токе возбуждения  $i_B$ , соответствующем работе с  $\cos \varphi = 1$ . Любые изменения  $i_B$  (увеличение или уменьшение) будут сопровождаться увеличением тока  $I_1$ .

### 3.12.4. Компенсирующая способность СД

В режиме перевозбуждения СД являются генераторами реактивной мощности, в режиме недовозбуждения – потребителями реактивной мощности.

Компенсирующая способность СД:

$$q_{\max} \% = \left[ \sin \varphi_H + (1 - \beta) \left( \frac{\sin \varphi_H}{48 \sin \varphi_H - 32} + 0,4 \right) \right] \cdot 100,$$

где  $q_{\max} \%$  – наибольшая компенсирующая способность:

$$q_{\max} \% = \frac{Q \cdot 100}{S_H},$$

$\beta$  – коэффициент нагрузки ( $\geq 0,5$ ),

$$S_H = \frac{P_{2H}}{\eta_H \cos \varphi_H}; \quad Q - \text{кВАр}, P_2 - \text{кВт}; S - \text{кВА}.$$

Синхронные компенсаторы – это СД, работающие вхолостую ( $P_2 = 0$ ) и имеющие облегченную механическую конструкцию. Синхронные компенсаторы выпускаются мощностью с 5 МВАр (6,3 кВ) и с 15 МВАр (10,5 кВ). В режиме недовозбуждения компенсаторы могут потреблять  $Q = 0,5Q_H$ .

**Пример 3.12.4.1.** Определить наибольшую компенсирующую способность СД компенсатора, если  $P_{2H} = 630$  кВт,  $\eta_H = 0,9$ ,  $\cos \varphi_H = 0,9$ ,  $\beta = 1$ .

**Решение**

$$q_{\max} \% = \frac{Q_H \cdot 100}{S_H} = \left[ \sin \varphi_H + (1 - \beta) \left( \frac{\sin \varphi_H}{48 \sin \varphi_H - 32} + 0,4 \right) \right] \cdot 100 =$$

$$= \sin \varphi_H \cdot 100 = 44 \%, \text{ где } \sin \varphi_H = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} = 0,44,$$

$$S_H = \frac{P_{2H}}{\eta_H \cos \varphi_H} = \frac{630}{0,9 \cdot 0,9} = 777 \text{ кВА},$$

$$Q_H = S_H \cdot \sin \varphi_H = 777 \cdot 0,44 = 342 \text{ кВАр}.$$

### 3.12.5. Технические данные СД

Технические данные синхронных двигателей напряжением 6–10 кВ представлены в табл. 3.12.5.1.

Таблица 3.12.5.1

## Технические данные синхронных двигателей напряжением 6–10 кВ

| Тип двигателя      | Номинальное напряжение, кВ | Номинальная мощность |                  | КПД % | Располагаемая реактивная мощность двигателя при напряжении на зажимах, % |      |      |      |      |      |
|--------------------|----------------------------|----------------------|------------------|-------|--|------|------|------|------|------|
|                    |                            | активная, кВт        | Реактивная, кВАр |       | 95   |      | 100  |      | 105  |      |
|                    |                            |                      |                  |       | Коэффициент загрузки двигателя   |      |      |      |      |      |
|                    |                            |                      |                  |       | 0,6  | 0,8  | 0,6  | 0,8  | 0,6  | 0,8  |
| 1                  | 2                          | 3                    | 4                | 5     | 6  | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
| СДН4-49-6          | 6                          | 1000                 | 510              | 95,2  | 1,5  | 1,4  | 1,36 | 1,29 | 1,15 | 1,08 |
| СДН15-39-6         | 6                          | 1600                 | 811              | 95,7  | 1,47   | 1,35 | 1,35 | 1,26 | 1,21 | 1,12 |
| СДН16-69-6         | 6                          | 4000                 | 2005             | 96,7  | 1,41   | 1,25 | 1,32 | 1,23 | 1,16 | 1,12 |
| СДН 16-104-6       | 6                          | 6300                 | 3147             | 97,1  | 1,45   | 1,31 | 1,32 | 1,25 | 1,12 | 1,09 |
| СДН 17-119-6       | 6                          | 10000                | 4978             | 97,3  | 1,47   | 1,35 | 1,33 | 1,25 | 1,10 | 1,07 |
| СДН18-71-12        | 6                          | 6300                 | 3160             | 96,7  | 1,45   | 1,33 | 1,31 | 1,25 | 1,03 | 1,07 |
| СДН18-111-12       | 6                          | 10000                | 4991             | 97,4  | 1,55   | 1,45 | 1,37 | 1,30 | 1,14 | 1,08 |
| СДН19- 54-24       | 6                          | 4000                 | 2027             | 95,6  | 1,41   | 1,28 | 1,27 | 1,23 | 1,07 | 1,07 |
| СДН18-14-40        | 6                          | 320                  | 181              | 85,5  | 1,44   | 1,37 | 1,30 | 1,24 | 1,12 | 1,08 |
| СДН18-24-40        | 6                          | 500                  | 268              | 90,8  | 1,48   | 1,40 | 1,32 | 1,26 | 1,13 | 1,08 |
| СДН19-31-60        | 6                          | 800                  | 429              | 90,4  | 1,47   | 1,39 | 1,31 | 1,25 | 1,06 | 1,05 |
| СДН20-31-60        | 6                          | 1600                 | 837              | 92,4  | 1,57   | 1,51 | 1,35 | 1,30 | 1,09 | 1,06 |
| СДН213/24-10       | 6                          | 1300                 | 663              | 95,0  | 1,47   | 1,28 | 1,42 | 1,29 | 1,33 | 1,22 |
| СДС 16-41-20       | 6                          | 800                  | 416              | 93,6  | 1,53   | 1,45 | 1,33 | 1,28 | 1,10 | 1,06 |
| СДК 18-16-36       | 6                          | 400                  | 216              | 90,0  | 1,52   | 1,46 | 1,33 | 1,28 | 1,12 | 1,07 |
| СТМ 1500-2         | 6                          | 1500                 | 763              | 95,4  | 1,57   | 1,38 | 1,50 | 1,32 | 1,41 | 1,24 |
| СТМ 3500-2         | 6                          | 3500                 | 1765             | 96,2  | 1,56   | 1,35 | 1,51 | 1,32 | 1,43 | 1,26 |
| СТМ 12000-2        | 6                          | 12000                | 5972             | 97,5  | 1,57   | 1,34 | 1,54 | 1,33 | 1,48 | 1,28 |
| СДС3 19-12<br>5-16 | 6                          | 19500                | 7500             | 96,7  | I; 50  | 1,40 | 1,35 | 1,27 | 1,17 | 1,10 |
| МС 325-20/12       | 10                         | 9000                 | 7500             | 85,5  | 1,80   | 1,59 | 1,47 | 1,43 | 1,07 | 1,04 |
| МС 213-15/18       | 10                         | 5000                 | 3900             | 96,4  | 1,26   | 1,21 | 1,16 | 1,14 | 1,01 | 1,01 |
| ДСЗ 1811-6         | 10                         | 2580                 | 1307             | 95,6  | 1,57   | 1,42 | 1,46 | 1,32 | 1,29 | 1,17 |
| СДНЗ 15-49-10      | 10                         | 1250                 | 636              | 95,3  | 1,48   | 1,37 | 1,35 | 1,26 | 1,20 | 1,11 |
| СДН 16-71-10       | 10                         | 1600                 | 820              | 94,7  | 1,70   | 1,59 | 1,43 | 1,38 | 1,11 | 1,06 |
| СДСЗ 16-10-6       | 10                         | 1230                 | 960              | 96,2  | 1,35   | 1,27 | 1,27 | 1,19 | 1,15 | 1,03 |
| СДСЗ 290-12-16     | 10                         | 4200                 | 2136             | 95,4  | 1,65   | 1,57 | 1,40 | 1,35 | 1,11 | 1,06 |
| СДСЗ 19-12<br>5-16 | 10                         | 18500                | 5200             | 97,4  | 1,89   | 1,75 | 1,52 | 1,42 | 1,17 | 1,10 |

## 3.12.6. Неисправности СД

Основные неисправности СД представлены в табл. 3.12.6.1.

## Основные неисправности СД и их причины

| П/п | Неисправность  | Причина  |
|-----|--|--|
| 1   | Двигатель не идет в ход; в одной фазе статора нет тока   | Обрыв в одной фазе сети или внутренний обрыв в обмотке статора при соединении фаз звездой  |
| 2   | Двигатель не идет в ход или идет в ход, но не разворачивается до номинальной скорости; сила тока во всех трех фазах одинакова. | а) при пуске пониженное напряжение сети;<br>б) слишком велика нагрузка при пуске;<br>в) при автотрансформаторном пуске возбуждение в двигатель подается не при полном напряжении на зажимах статора, а при пониженном. Двигатель не развивает подсинхронный момент, необходимый для вхождения двигателя в синхронизм;<br>г) межвитковое соединение в некоторых катушках обмотки возбуждения. |
| 3   | Двигатель не идет в ход и сильно гудит. Сила тока во всех трех фазах различна. Часть обмотки статора сильно нагревается.       | а) межвитковое соединение в обмотке статора;<br>б) неправильно соединены катушки одной фазы; одна или несколько катушек «перевернуты»;<br>в) обмотка одной фазы замкнута на землю в двух местах;<br>г) короткое замыкание между двумя фазами;  |
| 4   | При работе двигателя происходят колебания ротора. Двигатель выпадает из синхронизма.   | а) слишком быстро изменяется нагрузка, необходимо увеличить ток возбуждения;<br>б) колебания передаются от приводимых механизмов, например, поршневых компрессоров, насосов и т.п.;<br>в) сильно колеблются напряжение и частота – короткое замыкание в питающей сети;<br>г) двигатель перегружен;<br>д) повреждение в сети питающей ротор двигателя.  |
| 5   | Обмотка возбуждения нагрета выше нормы. Ток возбуждения больше номинального.   | а) двигатель работает с повышенным против номинального напряжением;<br>б) двигатель работает с пониженным коэффициентом мощности, т.е. его реактивная мощность слишком велика;<br>в) межвитковое соединение или замыкание на корпус в двух местах обмотки возбуждения.   |

## 3.13. Машины постоянного тока

## 3.13.1. Общие сведения

**Машина постоянного тока** – электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую постоянного тока (генератор) или для обратного преобразования (двигатель). Машина постоянного тока обратима.

Машина постоянного тока образуется из синхронной обращенной конструкции, если её якорь снабдить коллектором, который в генераторном

режиме играет роль выпрямителя, а в двигательном – преобразователя частоты. Благодаря наличию коллектора по обмотке якоря проходит переменный ток, а во внешней цепи, связанной с якорем, – постоянный.

### Принцип действия

Машина постоянного тока может работать в двух режимах: двигательном и генераторном, в зависимости от того, какую энергию к ней подвести – если электрическую, то электрическая машина будет работать в режиме электродвигателя, а если механическую – то будет работать в режиме генератора. Однако электрические машины, как правило, предназначены заводом изготовителем для одного определенного режима работы – или в режиме генератора, или электродвигателя.

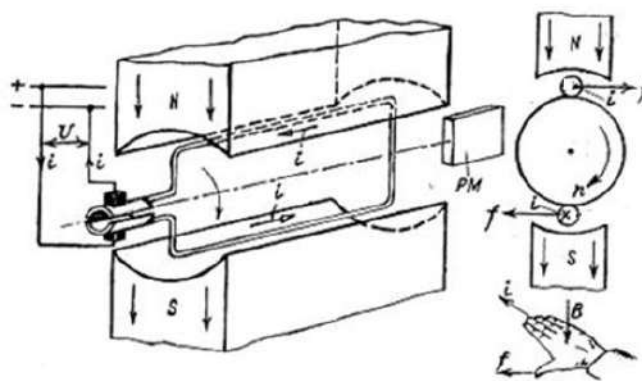


Рис. 3.13.1.1. Принцип работы машины постоянного тока

### Электродвигатель

Электродвигатели постоянного тока стоят почти на каждом автомобиле – это стартер, электропривод стеклоочистителя, вентилятор отопителя салона и др.

В роли индуктора выступает статор, на котором расположена обмотка. На неё подаётся постоянный ток, в результате чего вокруг неё создаётся постоянное магнитное поле. Обмотка ротора состоит из проводников, запитанных через коллектор. В результате на них действуют пары сил Ампера, которые вызывают вращающий момент. Направление сил определяется по правилу «буравчика». Однако этот вращающий момент способен повернуть ротор только на 180 градусов, после чего он остановится. Чтобы это предотвратить, используется щёточно-коллекторный узел, выполняющий роль переключателя полюсов и датчика положения ротора (ДПР).



Рис. 3.13.1.2. Конструкция двигателя постоянного тока

### Генератор

В генераторе индуктором также является статор, создающий постоянное магнитное поле между соответствующими полюсами. При вращении ротора в проводниках обмотки якоря, перемещающихся в магнитном поле, по закону электромагнитной индукции наводится ЭДС, направление которой определяется по правилу правой руки. Переменная ЭДС обмотки якоря выпрямляется с помощью коллектора, через неподвижные щетки, посредством которых обмотка соединяется с внешней сетью.

### 3.13.2. Пуск электродвигателей постоянного тока

В момент пуска скорость вращения двигателя равна нулю, Поэтому противо – ЭДС. также равна нулю:

$$E = cn\phi,$$

где  $c$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа пар полюсов, проводников и параллельных ветвей обмотки якоря;

$n$  – скорость вращения двигателя;

$\phi$  – магнитный поток.

Пусковой ток двигателя в этом случае:

$$I_{\text{п}} = \frac{U}{r_{\text{я}}} \approx 25 \div 50 I_{\text{н}},$$

достигает величины, опасной для целости обмотки якоря и коллектора. Во избежание этого, на время пуска последовательно в цепь якоря включают пусковой реостат. По мере увеличения скорости  $n$  в обмотке якоря возникает противо-ЭДС и ток якоря станет быстро уменьшаться. Сопротивление реостата к концу пуска должно быть полностью выведено. Пусковой реостат выбирают с расчетом уменьшения пускового тока двигателя до величины, в  $2 \div 2,5$  раза большей номинального тока.

Для быстрого увеличения противо-ЭДС в пусковой период двигатель должен получить полное возбуждение, т.е. сопротивление в цепи возбуждения должно быть выведено.

**Пример 3.13.2.1.** Напряжение сети  $U = 220$  В,  $E = 216$  В, сопротивление обмотки якоря  $r_{\text{я}} = 0,2$  Ом. Определить  $I_{\text{н}}$ ,  $I_{\text{п}}$  (без реостата и с реостатом),  $r_{\text{п}}$ .

**Решение**

1.  $I_{\text{н}} = \frac{U-E}{r_{\text{я}}} = \frac{220-216}{0,2} = 20$  А.

2.  $I_{\text{п}} = \frac{U}{r_{\text{я}}} = \frac{220}{0,2} = 1100$  А (без реостата).

3. Выбираем пусковой ток, в 2 раза больший  $I_{\text{н}}$ :

$$I_{\text{п}} = 2 \cdot 20 = 40 \text{ А (с реостатом).}$$

4. Сопротивление цепи якоря:

$$r = \frac{U}{I_{\text{п}}} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ Ом.}$$

5. Сопротивление пускового реостата:

$$r_{\text{п}} = 5,5 - 0,2 = 5,3 \text{ Ом.}$$

### 3.13.3. Электродвигатели серии 2П

Электродвигатели серии 2П предназначены для работы в приводах постоянного тока с широким регулированием скорости, а также в системах тиристорного электропривода.

Сравнение Серии 2П с серией П:

- 1) мощность при одном и том же значении высоты оси вращения в 2–3 раза увеличена;
- 2) диапазон регулирования скорости увеличен в 1,5 раза;
- 3) механическая инерционность якоря при равной мощности уменьшена на 30–40 %;
- 4) удвоен срок службы [23].

Серия 2П охватывает электродвигатели с вращающим моментом от 2,4 до 1250 Нм, что при номинальной частоте вращения 1500 об/мин соответствует диапазону мощностей от 0,37 до 200 кВт. В новой серии принято одиннадцать габаритов, в каждом по две длины станины.

Электродвигатели классифицируются:

- 1) по способу охлаждения и роду защиты от воздействия окружающей среды (ГОСТ 17494);
- 2) по конструктивным формам исполнения (ГОСТ 2479): горизонтального и вертикального исполнений, на лапах и с фланцем, с фланцем без лап;
- 3) по частоте вращения – с номинальной частотой 750, 1000, 1500, 2200, 3000 об/мин;
- 4) по напряжению источника питания – 110, 220, 440 В;
- 5) по напряжению возбуждения – 110, 220 В.

Все модификации, кроме исполнений с двумя свободными концами вала, могут иметь пристроенный тахогенератор.

Обозначение машин этой серии:

2П – наименование серии;

А – защищенное исполнение с самовентиляцией;

Н – защищенное исполнение с независимой вентиляцией от постороннего вентилятора;

Б – закрытое исполнение с естественным охлаждением;

О – закрытое исполнение с наружным обдувом от постороннего вентилятора с тахогенератором, К – исполнение с двумя свободными рабочими концами вала.

Стоящее после дефиса трехзначное число обозначает габарит машины и соответствует высоте оси вращения (в миллиметрах);

М – первая порядковая длина машины;

Л – вторая порядковая длина машины.

Например, 2ПНТ-160 Л – электродвигатель постоянного тока, защищенного исполнения с независимой вентиляцией от постороннего вентилятора, с тахогенератором, высота ося вращения 160 мм, второй длины.

Технические данные электродвигателей 2П с самовентиляцией при частоте вращения  $n = 1500$  об/мин для продолжительного режима работы  $S_1$  (ГОСТ 183) приведены в табл. 3.13.3.1.

Таблица 3.13.3.1

Технические данные электродвигателей 2П

| Тип       | Р, кВт | Масса кг | Момент инерции, кг м <sup>2</sup> |
|-----------|--------|----------|-----------------------------------|
| 2ПА-90М   | 0,37   | 24       | 0,004                             |
| 2ПА-90L   | 0,55   | 27       | 0,005                             |
| 2ПА-100М  | 0,75   | 36       | 0,011                             |
| 2ПА-100L  | 1,1    | 39       | 0,012                             |
| 2ПА-112М  | 1,5    | 47       | 0,015                             |
| 2ПА-112 L | 2,2    | 56       | 0,017                             |
| 2ПА-132М  | 3,0    | 86       | 0,037                             |
| 2ПА-132 L | 5,5    | 96       | 0,047                             |
| 2ПА-160М  | 7,5    | 141      | 0,08                              |
| 2ПА-160 L | 11     | 159      | 0,12                              |
| 2ПА-180М  | 15     | 213      | 0,2                               |
| 2НА-180L  | 18,5   | 234      | 0,23                              |
| 2ПА-200М  | 22     | 282      | 0,25                              |
| 2ПА-200 L | 30     | 325      | 0,3                               |
| 2ПА-225М  | 37     | 340      | 0,53                              |
| 2ПА-225L  | 45     | 400      | 0,6                               |
| 2ПА-250М  | 55     | 510      | 1,1                               |
| 2ПА-250 L | 75     | 600      | 1,3                               |
| 2ПА-280М  | 110    | 740      | 2,2                               |
| 2ПА-280 L | 132    | 820      | 2,3                               |
| 2ПА-315М  | 160    | 950      | 4,2                               |
| 2ПА-315 L | 200    | 1180     | 4,5                               |

### **3.13.4. Неисправности электродвигателей постоянного тока**

#### **3.13.4.1. Искрение щеток**

- 1) щетки установлены неправильно (метки на траверсе не совпадают);
- 2) неправильно установлены щетки в щеткодержателях или щеткодержатели;
- 3) щетки слабо или слишком туго прижаты к коллектору;
- 4) использованы щетки разных сортов;
- 5) нажатие на щетки неодинаково;
- 6) коллектор загрязнен, неровен или бьёт;
- 7) главные и дополнительные полюсы чередуются неправильно.

#### **3.13.4.2. Перегрев машины**

- 1) машина перегружена;
- 2) вентиляционные пути машины засорились;
- 3) засорились воздушные фильтры.

#### **3.13.4.3. Перегрев обмотки якоря**

- 1) ухудшена вентиляция;
- 2) межвитковое соединение в одной или в нескольких катушках главных полюсов;
- 3) заусенцы, образовавшиеся при обточке коллектора, вызвали короткое замыкание обмотки якоря через пластины коллектора;
- 4) вследствие соединения между отдельными петушками или хомутиками произошло короткое замыкание обмотки.

#### **3.13.4.4. Перегрев коллектора и щеток**

- 1) выбрана неподходящая марка щеток;
- 2) поверхность коллектора неровная;
- 3) слабый контакт в щеточном аппарате и в цепи токоподводов.

#### **3.13.4.5. Перегрев обмотки возбуждения**

- 1) добавочное сопротивление в цепи ОВ мало или отсутствует;
- 2) регулятор возбуждения неисправен;
- 3) межвитковое соединение или короткое замыкание в одной или в нескольких катушках полюсов.

#### **3.13.4.6. Двигатель не идет в ход**

- 1) перегорели предохранители;
- 2) обрыв в пусковом реостате или в проводе;
- 3) обрыв в обмотке якоря;
- 4) неправильно соединена параллельная обмотка возбуждения;
- б) межвитковые соединения или короткое замыкание в катушках возбуждения.

## Глава 4. ЭЛЕКТРОПРИВОД

### 4.1. Механические характеристики электродвигателей

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его угловой скорости от вращающего момента, т.е.  $n = f(M)$ . Почти все электродвигатели обладают тем свойством, что скорость их является убывающей функцией момента двигателя.

Механические характеристики электродвигателей можно разделить на четыре основные категории:

1. Абсолютно жесткая механическая характеристика – это характеристика, при которой скорость с изменением момента остается неизменной. Такой характеристикой обладают синхронные двигатели.

2. Жесткая механическая характеристика – это характеристика, при которой скорость с изменением момента хотя и уменьшается, но в малой степени. Такой характеристикой обладают двигатели постоянного тока независимого возбуждения, а также асинхронные двигатели в пределах рабочей части. Для асинхронного двигателя жесткость в различных точках механической характеристики различна. Между максимальными (критическими) значениями моментов в двигательном Мкд и генераторном Мкг режимах характеристика асинхронного двигателя имеет сравнительно большую жесткость.

3. Мягкая механическая характеристика – это характеристика, при которой с изменением момента скорость значительно изменяется. Такую характеристику имеют двигатели постоянного тока последовательного возбуждения, особенно в зоне малых моментов.

4. Абсолютно мягкая механическая характеристика – это характеристика, при которой момент двигателя с изменением угловой скорости остается неизменным. Такую характеристику имеют двигатели постоянного тока независимого возбуждения при питании их от источника тока или при работе в замкнутых системах электропривода в режиме стабилизации тока якоря.

### 4.2. Расчет мощности электродвигателей при продолжительном режиме

#### А. Металлообработка

Мощность двигателя для токарных, токарно-винторезных, карусельных и строгальных станков:

$$P = \frac{F_c q_c V_p}{A \eta_c}, \text{ кВт},$$

где  $q_c$  – сечение стружки,  $\text{мм}^2$  ( $\text{м}^2$ )

$V_p$  – скорость резания,  $\text{м/с}$ ;

$F_c$  – удельное сопротивление резанию,  $(\text{кг/мм}^2)$ ,  $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ ;

$$F_c = (2 \div 5,5)F_{\text{разр}},$$

где  $F_{\text{разр}}$  – сопротивление разрыву, кг/мм<sup>2</sup> ( $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ );

$\eta_c$  – КПД станка (при полной загрузке 0,65–0,7) кроме строгальных,  
где  $\eta_c = 0,6$ –0,65  $A = 102$  (1000).

### Б. Насосы

Мощность двигателя для насоса:

$$P = \frac{KjQH}{A\eta_{\text{нас}}\eta_{\text{пер}}}, \text{ кВт},$$

где  $K = 1,1 \div 1,4$

$j$  – удельный вес жидкости, кг/м<sup>3</sup>,

для холодной воды  $j = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;

$Q$  – производительность насоса, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – напор насоса, м;

$A = 102$  (1000);

$\eta_{\text{пер}}$  – КПД передачи (при непосредственном соединении  $\eta_{\text{пер}} = 1$ );

$\eta_{\text{нас}}$  – КПД насоса (для поршневых насосов 0,7–0,98, для центробежных насосов с давлением ниже 40 м 0,3–0,6; более 40 м – 0,6–0,75).

У центробежного насоса мощность, напор, производительность и скорость вращения связаны соотношениями:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}; \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{M_1}{M_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2},$$

где  $M$  – момент двигателя.

### В. Вентиляторы

Мощность электродвигателя вентилятора:

$$P = 1,1 \frac{QH}{A\eta_{\text{вент}}\eta_{\text{пер}}}, \text{ кВт},$$

где  $Q$  – производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – давление, мм.вод.ст. ( $\text{Н}/\text{м}^2$ );

$\eta_{\text{вент}}$  – КПД вентилятора (для осевых 0,5–0,85), центробежных 0,4–0,7;

$\eta_{\text{пер}}$  – КПД передачи,  $A = 102$  (1000).

### Г. Компрессоры

Мощность двигателя поршневого компрессора:

$$P = \frac{QB}{A\eta_{\text{к}}\eta_{\text{пер}}}, \text{ кВт},$$

где  $Q$  – производительность компрессора, м<sup>3</sup>/с;

$\eta_{\text{к}}$  – КПД компрессора принимается равным 0,6–0,8;

$\eta_{\text{пер}}$  – КПД передачи;

$B$  – работа, затрачиваемая на сжатие 1 м<sup>3</sup> воздуха до заданных рабочих давлений, ат ( $\text{Н}/\text{м}^2$ ); для давления в 8 ат.

$B = 24700$  кг м.

$A = 102$  (1000).

## Глава 5. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

### 5.1. Краткие сведения о вентилях

В настоящее время для преобразования электроэнергии применяются исключительно надежные и экономические статические вентиляльные преобразователи, в которых основными элементами являются электрические вентили.

Вентилем называется прибор, имеющий один или несколько однопроводных путей для прохождения тока (т.е. путей с односторонней проводимостью), которые либо не обладают свойством управляемости, либо могут управляться ключевым способом (т.е. по принципу «включено – выключено»).

На практике нашли применение вентили следующих типов:

- а) электровакуумные, основанные на прохождении тока через вакуум;
- б) газоразрядные, основанные на прохождении тока через газ или пары металлов;
- в) полупроводниковые, основанные на процессах в твердом теле.

В устройствах преобразовательной техники главным образом используются полупроводниковые вентили.

Вольтамперная характеристика диода приведена на рис. 5.1.1.

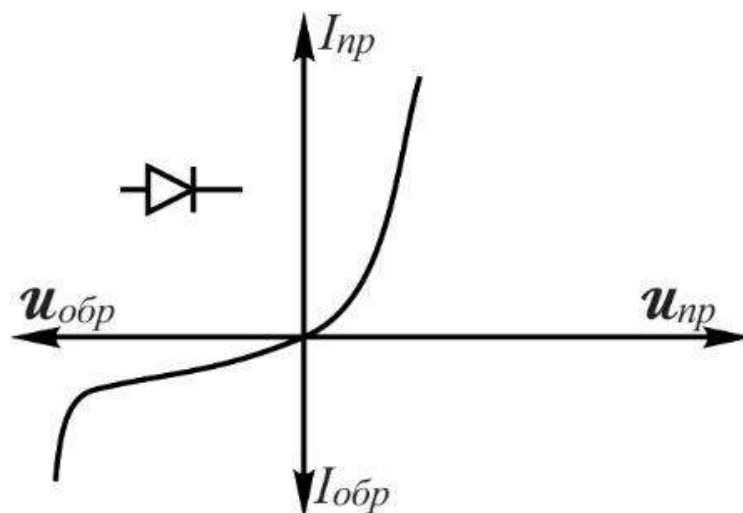


Рис. 5.1.1. Вольтамперная характеристика диода

### 5.2. Технические данные диодов

Технические данные диодов приведены в табл. 5.2.1.

## Основные характеристики диодов

| Марка диода | Id (ср)<br>А | $U_{обр}$ , В<br>ампл | Марка<br>диода | Id (ср) А | $U_{обр}$<br>В |
|-------------|--------------|-----------------------|----------------|-----------|----------------|
| ГД107А      | 0,02         | 15                    | Д7Ж            | 0,3       | 400            |
| ГД107Б      | 0,0025       | 20                    | Д202           | 0,4       | 100            |
| Д7А         | 0,3          | 50                    | Д203           | 0,4       | 200            |
| Д7Б         | 0,3          | 100                   | Д204           | 0,4       | 300            |
| Д7В         | 0,3          | 150                   | Д205           | 0,4       | 400            |
| Д7Г         | 0,3          | 200                   | Д206           | 0,1       | 100            |
| Д7Д         | 0,3          | 300                   | Д207           | 0,1       | 200            |
| Д7Е         | 0,3          | 350                   | Д208           | 0,1       | 300            |
| Д209        | 0,1          | 400                   | Д247Б          | 5         | 500            |
| Д210        | 0,1          | 600                   | Д248Б          | 5         | 600            |
| Д211        | 0,1          | 600                   | Д302           | 1         | 200            |
| Д217        | 0,1          | 800                   | Д302А          | 1         | 200            |
| Д218        | 0,1          | 1000                  | Д303           | 3         | 150            |
| Д226Б       | 0,3          | 400                   | Д303А          | 3         | 150            |
| Д226В       | 0,3          | 300                   | Д305           | 10        | 50             |
| Д226Г       | 0,3          | 200                   | Д1004          | 0,1       | 2000           |
| Д229В       | 0,4          | 100                   | Д1006          | 0,1       | 6000           |
| Д229Г       | 0,4          | 200                   | Д1007          | 0,075     | 8000           |
| Д229Д       | 0,4          | 300                   | Д1008          | 0,05      | 10000          |
| Д229Е       | 0,4          | 400                   | В10            | 10        | 100–1000       |
| Д229Ж       | 0,7          | 100                   | ВЛ-10          | 10        | 700–1000       |
| Д229И       | 0,7          | 200                   | В-25           | 25        | 100–1000       |
| Д229К       | 0,7          | 300                   | ВЛ-25          | 25        | 700–1000       |
| Д229Л       | 0,7          | 400                   | В-50           | 50        | 100–1000       |
| Д242        | 10           | 100                   | ВЛ-50          | 50        | 700–1000       |
| Д242А       | 10           | 100                   | В-200          | 200       | 100–1000       |
| Д242Б       | 5            | 100                   | ВЛ-200         | 200       | 700–1000       |
| Д243        | 10           | 200                   | В-320          | 320       | 100–1000       |
| Д243А       | 10           | 200                   | ВЛ-320         | 320       | 700–1000       |
| Д243Б       | 5            | 200                   | ВВ-320         | 320       | 100–1000       |
| Д245        | 10           | 300                   | ВЛВ-320        | 320       | 700–1000       |
| Д245А       | 10           | 300                   | ВВ-500         | 500       | 100–1000       |
| Д245Б       | 5            | 300                   | ВЛВ-500        | 500       | 100–1000       |
| Д246        | 10           | 400                   |                |           |                |
| Д246А       | 10           | 400                   |                |           |                |
| Д246Б       | 5            | 400                   |                |           |                |
| Д247        | 10           | 500                   |                |           |                |

*Примечания:* 1. Охлаждение силовых диодов (вентилей):

- ВЮ и ВЛ-10 – воздушное естественное;
- ВВ-320, ВЛВ-320, ВВ-500 и ВЛВ-500 – водяное принудительное;
- остальных приборов воздушное принудительное.

2. Скорость охлаждающего воздуха: В-25 и ВЛ-25 – 3 м/с.
3. Расход охлаждающей, воды:  
ВВ-320 . и ВЛВ-320 – 3 л/мин, для ВВ-500 и ВЛВ-500 – 4 л/мин.

### 5.3. Схемы выпрямления

Схемы выпрямления представлены на рис. 5.3.1.

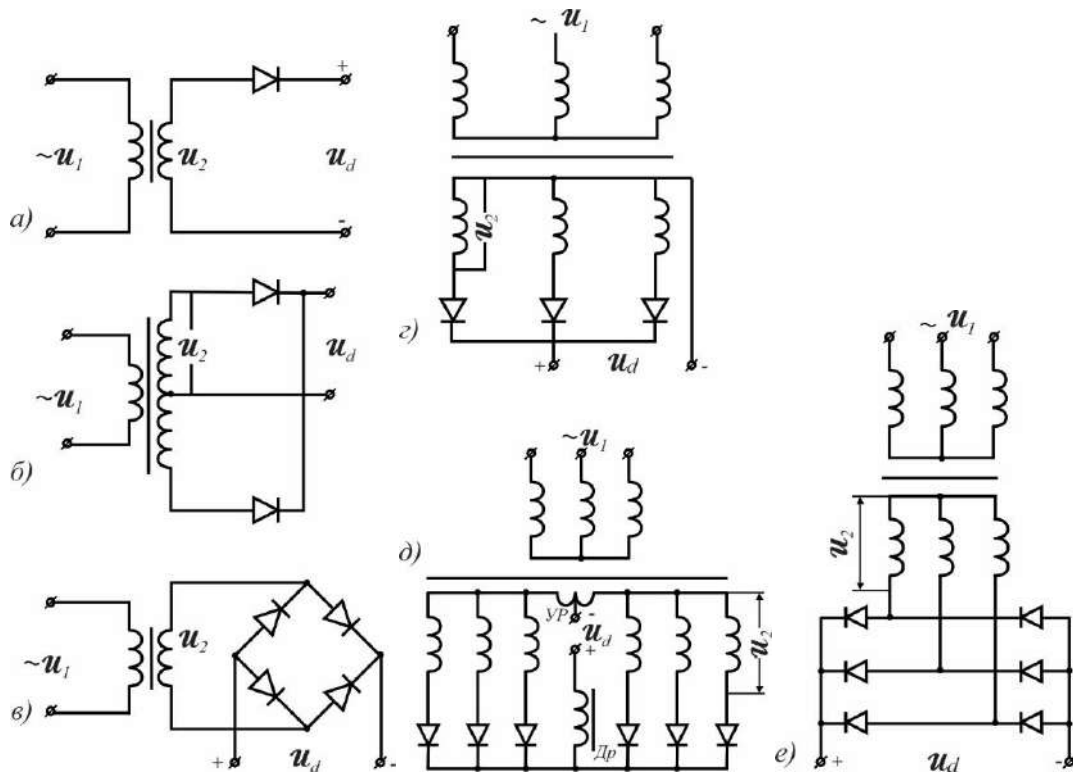


Рис. 5.3.1. Схемы выпрямления

Выпрямители подразделяются:

- 1) по числу фаз – однофазные и многофазные;
- 2) по прохождению через вторичную обмотку тока – одноконтные (рис. 5.3.1 а, б, г, д) и двухконтные (рис. 5.3.1 в, е).

Недостаток одноконтных схем:

- плохое использование трансформаторов;
- ток во вторичной обмотке протекает только в положительные полупериоды напряжения (в однофазных) и в течение одной трети каждого периода (в трехфазных).

В двухконтных схемах ток  $I_2$  проходит в обоих направлениях.

Коэффициенты схем выпрямления приведены в табл. 5.3.1.

## Коэффициенты выпрямления

| Схема<br>выпрямления<br>(рис.) | Выпрямитель       |                   | Вентили               |                         | Трансформатор        |                     |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|
|                                | $\frac{U_d}{U_2}$ | $\frac{I_d}{I_2}$ | $\frac{U_{обр}}{U_d}$ | $\frac{I_{\beta}}{I_d}$ | $\frac{I_{2Г}}{I_d}$ | $\frac{S_{Г}}{P_d}$ |
| Рис. 5.3.1(а)                  | 0,45              | 0,64              | 3,14                  | 1                       | 1,57                 | 3,09                |
| Рис. 5.3.1(б)                  | 0,9               | 1,27              | 3,14                  | 0,5                     | 0,79                 | 1,48                |
| Рис. 5.3.1(в)                  | 0,9               | 1,11              | 1,57                  | 0,5                     | 0,9                  | 1,23                |
| Рис. 5.3.1(г)                  | 1,17              | 1,73              | 2,1                   | 0,33                    | 0,58                 | 1,34                |
| Рис. 5.3.1(д)                  | 1,17              | 3,45              | 2,1                   | 0,17                    | 0,29                 | 1,26                |
| Рис. 5.3.1(е)                  | 2,34              | 1,23              | 1,05                  | 0,33                    | 0,81                 | 1,05                |

## 5.4. Вентили с удвоенным напряжением

При малых нагрузках ( $R_H \gg R_{ном}$ )  $U_d = 2U_{ампл.сети}$ .  
Частота пульсаций равна  $2f$  сети (рис. 5.4.1).

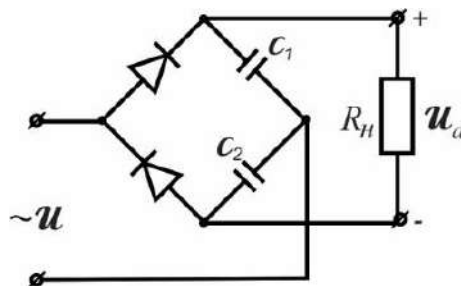


Рис. 5.4.1. Схема выпрямителя с частотой пульсаций равной  $2f$

Частота пульсаций равна  $f$  сети (рис 5.4.2).

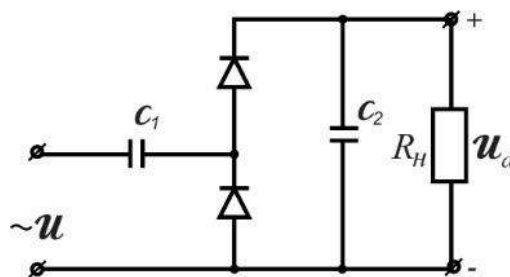


Рис 5.4.2. Схема выпрямителя с частотой пульсаций равной  $f$

Удобство этой схемы в том, что один из сетевых приводов можно заземлять, так как минус нагрузки соединен с сетью.

## 5.5. Краткие сведения о тиристорах

Впервые тиристоры были разработаны и выпущены для промышленного применения в 1957 году фирмой Дженерал Электрик Компани (США). На рис. 5.5.1 показана вольтамперная характеристика тиристора. Внешняя кривая соответствует отсутствию управляющего тока  $I_y = 0$ .

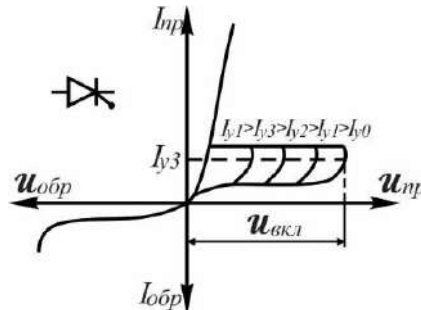


Рис. 5.5.1. Вольтамперная характеристика тиристора

В тиристоре чередуются слои с электронной и дырочной проводимостью (рис. 5.5.2).

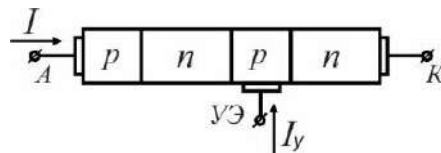


Рис. 5.5.2. Структура тиристора

Крайние два слоя p и n являются соответственно анодом и катодом. К внутреннему слою p присоединяется управляющий электрод.

Вентиль может быть открыт двумя способами:

1) подачей на анод тиристора напряжения большего, чем напряжение включения;

2) пропусканием через управляющий электрод-катод положительного  $I_y$ .

Открытый тиристор может быть заперт при  $I_y = 0$ :

1) уменьшением минимального значения ( $I_{\text{удержания}}$ );

2) кратковременной подачей на тиристор обратного напряжения, при котором катод вентиля будет иметь положительный потенциал по отношению к аноду.

Условное обозначение тиристора: Т160-9-1,45-1,75 ГОСТ 14069 – тиристор на предельный ток 160 А, повторяющееся напряжение 900 В с разбросом по прямому падению напряжения от 1,45 до 1,75 В.

Зависимость тока нагрузки тиристора от угла открывания и от условий охлаждения показана на рис. 5.5.3.

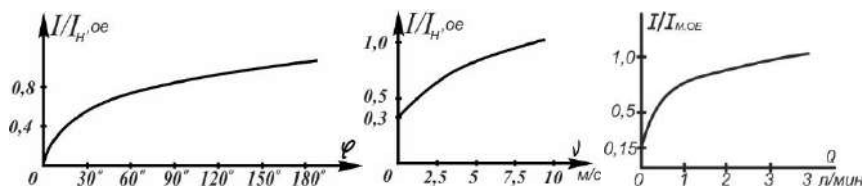


Рис. 5.5.3. Зависимость тока нагрузки тиристора от угла открывания и от условий охлаждения

## 5.6. Технические данные тиристорov

Таблица 5.6.1

Основные параметры тиристорov

| Тип тиристора | $I_{np}, A$ | $U_{обр\ max}, B$ | ТИП тиристора | $I_{np}, A$ | $U_{обр\ max}, B$ |
|---------------|-------------|-------------------|---------------|-------------|-------------------|
| КН102А        | 0,2         | 10                | 2У207А        | –           | 100               |
| КН102И        |             |                   | 2У207Е        | 10          | 300               |
| КУ101А        | 0,075       | 10                | КУ210А        | 2           | 400               |
| КУ101Б        | 0,075       | 50                | КУ210В        | (имп.)      | 600               |
| КУ101Г        | 0,075       | 80                | КУ211А        | –           | 700               |
| КУ101Е        | 0,075       | 150               | 2У211Ж        | 2           | 800               |
| 2У104А        | –           | –                 | Т10           | 10          | 50                |
| 2У104Г        | 0,1         | 6                 | Т100          | 100         | 1000              |
| 2У105А        | –           | –                 | ТЛ-100        | 100         | 1300–1700         |
| 2У105Е        | 0,050       | 5–30              | Т160          | 160         | 50–1000           |
| 2У107А        | –           | –                 | ТЛ160         | 160         | 300–700           |
| 2У107Д        | 0,050       | 10                | Т200          | 200         | 50–1000           |
| КУ201А        | 2           | 25–300            | ТБ200         | –           | –                 |
| КУ201Л        |             |                   | ТЛ250         | 250         | 300–700           |
| КУ202А        | 10          | 25                | ТВ-320        | 320         | 50–1000           |
| КУ202Н        | 10          | 400               | ТЛВ-320       | 320         | 300–700           |

*Примечания:* 1. Охлаждение Т10 – воздушное естественное; ТБ200, ТВ320, ТЛВ320 – водяное, остальных силовых тиристорov – воздушное принудительное

2. Скорость охлаждающего воздуха: Т25, Т50 – 7 м/с; Т100, ТЛ-ХОО, ТХ60, ТЛ160, Т200, ТЛ250 – 12 м/с;

3. Расход охлаждающей воды ТВ200 – 3 л/мин, остальных – 4 л/мин.

Обозначение тиристорov малой и средней мощности в соответствии с ГОСТ 10862 состоит из букв и цифр.

Первый элемент – полупроводниковый материал, из которого изготовлен прибор. В устройствах широкого применения:

- германий или его соединения – Г;
- кремний или его соединения – К;
- соединения галлия – А.

В устройствах специального назначения:

- германий или его соединения – 1;
- кремний или его соединения – 2;
- соединения галлия – 3.

Второй элемент обозначения определяет класс прибора:

- для диод-тиристоров – Н;
- для триод-тиристоров – У.

Третий элемент обозначения определяет назначение прибора:

Диодные:

- малой мощности (с допусаемым значением прямого тока не более 0,3 А) – 1;
- средней мощности (с допусаемым значением прямого тока более 0,3 А, но не более 10 А) – 2.

Триодные:

- незапираемые малой мощности – 1;
- средней мощности – 2;
- запираемые малой мощности – 3;
- средней мощности – 4;
- симметричные незапираемые малой мощности – 5;
- средней мощности – 6.

Четвертый и пятый элементы определяют порядковый номер разработки технологического типа прибора и обозначается от 01 до 99.

Шестой элемент указывает на разновидность данной группы тиристоров, отличающихся одним или несколькими параметрами (обозначается от А до Я).

Примеры: 2Н102А – диод-тиристор для устройств спецназначения, кремниевый, малой мощности, номер разработки 02, группа А;

КН214В – триод-тиристор не запираемый для устройств широкого применения, кремниевый, средней мощности, номер разработки 14, группа В.

ТБ253-1000-24-642-УХЛ2 – тиристор быстродействующий;

253 – модификация;

1000 – максимальный допустимый средний ток в открытом состоянии, А;

24 – класс по напряжению (2400 В);

6 – группа по критической скорости нарастания напряжения в закрытом состоянии;

4 – группа по времени включения;

УХЛ2 – климатическое исполнение.

## 5.7. Перегрузочная способность тиристоров по току

Нагрузочная способность тиристоров по току характеризуется, главным образом, их допустимым нагревом. Вследствие малых размеров теплоемкость структуры тиристора незначительная, и поэтому изменение температуры структуры тиристора очень быстро следует за изменением нагрузки.

Для каждого прибора приводятся зависимости перегрузочной способности от времени; например, для тиристора Т160 – на рис. 5.7.1.

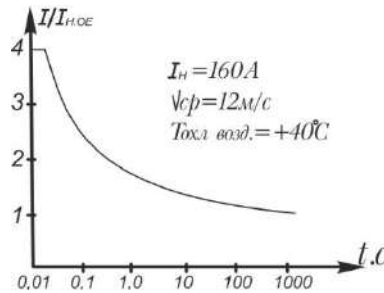


Рис. 5.7.1. Зависимости перегрузочной способности от времени

Если непосредственно перед перегрузкой через прибор протекает предельный ток, рабочие перегрузки недопустимы.

### 5.8. Температурный режим работы силовых тиристоров

Силовые тиристоры рассчитаны для работы при температуре охлаждающей воздушной среды от  $-50^{\circ}$  до  $+40^{\circ}$  °С и от  $+5^{\circ}$  до  $+30^{\circ}$  °С при охлаждении водой; максимально допустимой температуре электронно-дырочных переходов  $+125^{\circ}$  °С; относительной влажности воздуха до 99 % при температуре  $+35^{\circ}$  °С; высота над уровнем моря не более 1200 м. Нижний предел температуры вентиляционного элемента ( $-50^{\circ}$  °С) обусловлен необходимостью ограничивать до безопасного значения механические напряжения вследствие различных температурных коэффициентов расширения отдельных элементов. Верхний предел температуры ( $+125^{\circ}$  °С) ограничивается температурой припоев и циклоустойчивостью.

Температура структуры тиристора  $\theta$  определится:

$$\theta = \Delta P \cdot R_t + \theta_0,$$

где  $\Delta P$  – мощность потерь, Вт;  $R_t$  – тепловое сопротивление, град/Вт;

$\theta_0$  – температура окружающей среды, град.

Необходимо знать, что параметры четырехслойных приборов могут сильно изменяться в интервале температур (обычно от  $-50^{\circ}$  °С до  $+100^{\circ}$  °С).

### 5.9. Групповые включения полупроводниковых приборов

В мощных преобразовательных установках применяются параллельное и последовательное соединения полупроводниковых приборов: диодов, тиристоров. Неидентичность характеристик полупроводниковых приборов вызывает существенный разброс токов и напряжений при групповом соединении.

Для выравнивания токов между параллельно включенными вентилями необходимо либо подобрать вентили с одинаковыми прямыми вольт-амперными характеристиками, либо применить средства принудительного выравнивания токов при помощи резисторов или индуктивных делителей тока (рис. 5.9.1).

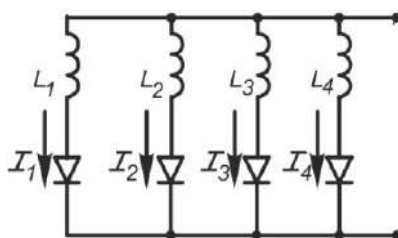


Рис. 5.9.1. Схема для выравнивания токов

При первом способе упрощается конструкция, уменьшаются массогабаритные показатели и стоимость преобразователей, более высокий КПД установки, равномерное токораспределение. Недостатком этого способа является то, что при выходе из строя одного из приборов последний необходимо заменить только идентичными, что неудобно в эксплуатации.

Индуктивные делители уменьшают крутизну нарастания тока и коммутационные потери в тиристорах, что особенно важно при наличии RC-цепочек, обеспечивают надежное отпирание тиристоров.

Как при параллельном, так и при последовательном соединении тиристоров и диодов требуется применение принудительных средств выравнивания прямых и обратных напряжений. Схема на рис. 5.9.2 обеспечивает размерное распределение напряжения во всех режимах и в случае согласования параметров RC-цепочек с параметрами питающей сети ограничивает скорость нарастания прямого напряжения на тиристорах. Чтобы исключить влияние активного сопротивления на скорость нарастания прямого напряжения на тиристорах, резистор шунтируют диодом (на рис. 5.9.2 показано штриховыми линиями).

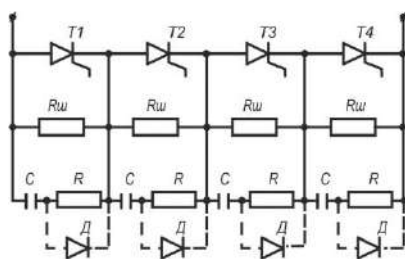


Рис. 5.9.2. Шунтирование резистора диодом

Число параллельно включенных вентилях выпрямителя:

$$n_{\text{пар}} = \frac{I_d}{I_B},$$

где  $I_d$  – выпрямленный ток, А;

$I_B$  – допустимое среднее значение прямого тока вентиля, А.

Число последовательно включенных вентилях выпрямителя:

$$n_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{обр max}}}{U_B},$$

где  $U_{\text{обр max}}$  – максимальное обратное напряжение, В;

$U_B$  – номинальное рабочее напряжение вентиля, В.

Значения  $\frac{I_d}{I_B}$  и  $\frac{U_{\text{обр max}}}{U_B}$  для различных схем выпрямления приведены в табл. 5.3.1.

Затем значения  $n_{\text{пар}}$ ,  $n_{\text{посл}}$ , округляют до ближайшего большего целого числа.

## 5.10. Высокочастотные установки

### 5.10.1. Преобразователи частоты

#### А. Состав оборудования

Любая высокочастотная установка имеет ряд одинаковых элементов:

- 1) индуктор одновитковой или много витковый;
- 2) генератор высокой частоты (машинный, ламповый, ионный, тиристорный);
- 3) конденсаторная батарея;
- 4) закалочный трансформатор, автотрансформатор или устройство для переключения витков индуктора;
- 5) контактор для подключения и отключения тока нагрузки;
- 6) линия передачи тока высокой частоты от источника питания до индуктора;
- 7) система водяного охлаждения;
- 8) высокочастотные измерительные приборы: амперметр, вольтметр, ваттметр, фазометр;
- 9) амперметр для измерения тока возбуждения;
- 10) измерительные трансформаторы напряжения и тока.

Правильный выбор оборудования установки, его рациональное размещение и согласование между собой составляют одну из задач проектирования установок.

#### Б. Типы преобразователей

Преобразователи частоты подразделяются на несколько типов: машинные, ламповые и статические.

Частота выходного напряжения машинного преобразователя:

$$f = \frac{Zn}{60} \text{ Гц},$$

где  $Z$  – число зубцов ротора;  
 $n$  – частота вращения, об/мин.

Частота вращения – это номинальная, а не максимальная скорость электродвигателя.

Частота выходного напряжения лампового генератора определяется собственной частотой колебательного контура:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

где  $L$  и  $C$  – индуктивность и емкость контура.

Преобразование частоты в статических преобразователях осуществляется за счет коммутации постоянного тока управляемыми вентилями.

К недостаткам машинных преобразователей относится уменьшение их КПД при неполной загрузке. Это приводит к повышенному среднему расходу электроэнергии, потому что невозможно загрузить любой генератор в режиме работы высокочастотной установки на номинальную мощность в течение всего времени его работы. Вторым недостатком – наличие вращающихся частей. Поэтому в настоящее время в качестве источников питания электротермических установок токами повышенной частоты в диапазоне 200–10000 Гц могут использоваться статические преобразователи частоты (СПЧ).

Существуют два типа СПЧ: со звеном постоянного тока и с непосредственной связью. Структурная схема СПЧ со звеном постоянного тока показана на рис. 5.10.1.1.

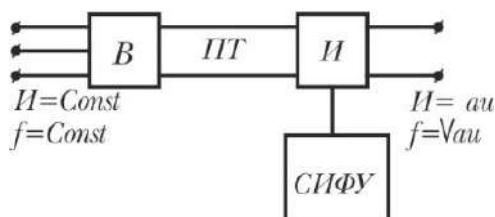


Рис. 5.10.1.1. СПЧ со звеном постоянного тока

$B$  – выпрямитель,  $ПТ$  – звено постоянного тока,  
 $И$  – инвертор,  $СИФУ$  – система импульсно-фазового управления

У СПЧ с непосредственной связью выходная частота не должна быть больше  $1/3$  входной частоты, поэтому электропривод в данном случае обеспечивает работу двигателя только на пониженных скоростях.

Включение тиристорov в СПЧ осуществляется импульсами, подаваемыми на управляющий электрод, а выключение обратным напряжением, приложенным к промежутку анод-катод тиристора. В основном в качестве источника напряжения выключения тиристора используется коммутирующая емкость.

По способу включения коммутирующей емкости инверторы делят на параллельные, последовательные и смешанные. Основными разновидностями схем по структуре являются нулевая, мостовая и различные варианты многоячейковых схем. По способу возбуждения инверторы могут выполняться с независимым возбуждением от задающего генератора и с самовозбуждением. Одной из разновидностей инвертора с независимым возбуждением является схема с автоматической подстройкой режима за счет обратной связи нагрузки на задающий генератор.

Достоинство СПЧ:

- 1) большая надежность в работе (отсутствие вращающихся частей);
- 2) малые затраты на эксплуатацию и ремонт;
- 3) высокий КПД при неполной нагрузке из-за малых потерь холостого хода;
- 4) наличие большого числа каналов регулирования: напряжения выпрямителя, напряжения и частоты инвертора;
- 5) мгновенная готовность к работе.

### В. Регулирование напряжения тиристорного преобразователя

Выходное напряжение тиристорного преобразователя определяется напряжением сети питания преобразователя, фазой импульсов управления и углом проводимости вентильных ветвей преобразователя (угол проводимости – это время, в течение которого тиристор проводит ток).

Плавное регулирование выходного напряжения преобразователя достигается путем изменения угла управления. Угол управления – это промежуток времени от момента естественной коммутации тиристора (этот момент соответствует моменту включения вентиля в неуправляемом выпрямителе) до момента подачи управляющего импульса на его управляющий электрод, т.е. до момента включения тиристора. Угол управления измеряется в электрических градусах. Среднее значение выпрямленного напряжения при непрерывном токе нагрузки:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha,$$

где  $U_{d0}$  – выпрямленное напряжение при  $\alpha = 0$ .

Изменение угла управления является основной задачей системы импульсно-фазового управления (СИФУ) тиристорного преобразователя. Блок-схема СИФУ приведена на рис. 5.10.1.2.

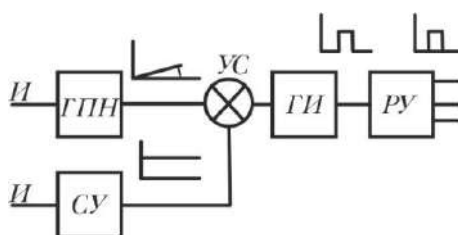


Рис. 5.10.1.2. Блок-схема СИФУ

Разность напряжений (пилообразного напряжения ГПН и выходного напряжения согласующего устройства СУ) подается на вход генератора импульсов ГИ через узел сравнения УС. Размножающее устройство служит для размножения управляющих импульсов в случае наличия в одной фазе выпрямителя нескольких вентилях. Изменяя величину напряжения управления  $U_y$  на выходе СУ, мы регулируем момент генерирования отпирающих импульсов, тем самым изменяем угол регулирования  $\alpha$ , а значит и выпрямленное напряжение тиристорного преобразователя.

### 5.11. Технические данные тиристорных преобразователей частоты для электротехнических установок

Технические данные тиристорных преобразователей сведены в табл. 5.11.1.

Таблица 5.11.1

Основные технические данные тиристорных преобразователей

| Тип преобразователя | Номинальная выходная мощность, кВт | Полная выходная мощность, кВА | Номинальный выходной ток, А | Выходная частота, кГц | Коэффициент полезного действия, % | Коэффициент мощности на выходе в номинальном режиме | Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч | Масса, т не более |
|---------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---|--|-------------------|
| ТПЧ-800-1-0         | 800                                | 1250                          | 1550                        | 1,0(-2)               | 94                                | 0,92  | 4  | 2,75              |
| ТПЧ-500-2-4         | 500                                | 1000                          | 1250                        | 2,4(-0,48)            | —                                 | —   | —  | 2,65              |
| ТПЧ-320-1-0         | 320                                | 520                           | 650                         | 1,0(-0,2)             | —                                 | —   | 2  | 1,5               |
| ТПЧ-250-2-4         | 250                                | 425                           | 530                         | 2,4(-0,48)            | —                                 | —   | —  | —                 |
| ТПЧ-160-4-0         | 160                                | 200                           | 250                         | 4,0(-0,8)             | 90                                |   | 2,5  |                   |
| СЧИ-100-2-4         | 100                                | 170                           | 210                         | 2,4(-0,48)            | 88                                | 0,9   | 1,5  | 1,15              |
| СЧИ-100-10          | 100                                | 125                           | 310                         | 10(±0,5)              |                                   |   |  | 0,7               |
| ТПЧ-3200-0,5        | 3200                               | 5000                          | 6200                        | 0,5(-0,1)             | 94                                | 0,92  | 20   | 11                |
| ТПЧ-3200-1,0        |                                    |                               |                             | 1,0(-0,1)             |                                   |   |  |                   |
| ТПЧ-2400-0,5        | 2400                               | 3700                          | 4650                        | 0,5(-0,1)             |                                   |   | 15   | 8,25              |
| ТПЧ-2400-1,0        |                                    |                               |                             | 1,0(-0,2)             |                                   |   |  |                   |
| ТПЧ-1600-0,5        | 1600                               | 2500                          | 3100                        | 0,5(-0,1)             |                                   |   | 10   | 5,5               |
| ТПЧ-1600-1,0        |                                    |                               |                             | 1,0(-0,2)             |                                   |   |  |                   |

## 5.12. Электросварочное оборудование

Технические данные однофазных сварочных однополюсных трансформаторов для ручной дуговой сварки приведены в табл. 5.12.1.

Таблица 5.12.1

Технические данные сварочных трансформаторов

| Тип     | Режим работы ПВ % | $I_n$ сварочный, А | Предел регулирования сварочного тока, А | $U_n$ В     |                          |                    |                           | $\eta_n$ | $\cos \varphi_n$ |
|---------|-------------------|--------------------|---|-------------|--------------------------|--------------------|---------------------------|----------|------------------|
|         |                   |                    |   | $P_n$ , кВт | Напряжение питающей сети | Рабочее напряжение | Напряжение холостого хода |          |                  |
| ТСП-1   | 20                | 160                | 105–180                                 | 12          | 220–380                  | 25                 | 65–70                     | 0,75     | 0,46             |
| ТСП-2   | 20                | 300                | 90–300                                  | 19,4        | 220–380                  | 30                 | 62                        | –        | 0,60             |
| ТСК-500 | 60                | 500                | 165–650                                 | 27          | 380                      | 30                 | 60                        | 0,85     | 0,65             |
| ТС-300  | 60                | 300                | 110–385, 30–100                         | 20          | 220–380                  | 30                 | 63                        | 0,84     | 0,51             |
| ТС-500  | 60                | 500                | 165–650                                 | 32          | 220–380                  | 30                 | 60                        | 0,85     | 0,53             |
| СТШ-500 | 60                | 500                | 145–650                                 | 33          | 380                      | 30                 | 60                        | 0,90     | 0,53             |
| ТДН-1   | 20                | 160                | 55–175                                  | 11,4        | 380–220                  | 26                 | 68                        | 0,72     | 0,50             |
| СТП-450 | 65                | 450                | 80–800                                  | 40          | 380–220                  | 30                 | 90                        | 0,85     | –                |

Технические данные сварочных преобразователей представлены в табл. 5.12.2.

Таблица 5.12.2

Технические данные сварочных преобразователей

| Тип преобразователя      | Тип                   |           | $I_n$ , А | Пределы регулирования сварочного тока, А | $P_n$ , кВт |           | $U_n$ , В |
|--------------------------|-----------------------|-----------|-----------|--|-------------|-----------|-----------|
|                          | сварочного генератора | двигателя |           |  | Генератора  | Двигателя |           |
| Однопостовый ПСО-300-3   | ГСО-300-3             | АВ62-4    | 300       | 100–300                                  | 9,6         | 14        | 32        |
| То же ПСГ-500-1          | ГСГ-500-1             | А7.1-2    | 500       | 60–500                                   | 25          | 30        | 40        |
| То же ПС-1000            | СГ-1000-11            | А382-4    | 1000      | 300–1000                                 | 45          | 55        | 45        |
| Многопостовый ПСМ-1000-4 | ГСМ-1000-4            | А282-2    | 1000      | –  | 60          | 75        | 60        |
| Универсальный ПСУ-500    |                       | А 71-2    | 500       | 120–500                                  | 20          | 30        | 20–40     |

Технические данные трехфазных сварочных выпрямителей представлены в табл. 5.12.3.

Таблица 5.12.3

## Технические данные трехфазных сварочных выпрямителей

| Выпрямитель  | Режим работы ПВ % | $I_n$ сварочный, А | Потр. мощн., кВт | $U_n$ , В     |         | $\eta_n$ | $\cos \varphi_n$ | Масса, кг | Назначение  |
|--|-------------------|--------------------|------------------|---------------|---------|----------|------------------|-----------|---|
|  |                   |                    |                  | Питающей сети | Рабочее |          |                  |           |   |
| Сварочный: ЕС-300  | 65                | 300                | 13               | 380           | 20–40   | 0,70     | 0,90             | 250       | Питание сварочных автоматов, автоматическая сварка под флюсом |
| ЕСУ-600  | 55                | 600                | 31               | 380           | 20–40   | 0,75     | 0,93             | 450       |   |
| ВКСУ-500х2   | 60                | 1000               |                  | 380           | 40      | 0,74     | 0,75             | 850       |   |
| ВДГ-301  | 60                | 300                | –                | 380           | 30      | 0,72     | 0,88             | 210       | Сварка в среде углекислого газа                               |
| ВДГ-501  | 60                | 500                |                  | 380           | 50      | 0,65     | 0,75             | 350       |   |
| ВДМ3001<br>Однопостовой сварочный                                | 100               | 300                | 230              | 380           | 60      | 0,88     | 0,89             | 1750      |   |
| ЕСС-300-3  | 65                | 300                | 21,5             | 220–330       | 20      | 0,66     | 0,60             | 280       |   |
| ВКС500-1   | 60                | 500                | –                | 380           | 40      | 0,74     | 0,65             | 385       | Автоматическая сварка и наплавка металла                      |
| РД-101   | 60                | 125                | 9                | 220–380       | 25      | 0,62     | 0,53             | 170       |   |
| РД301  | 60                | 300                | 21               | 220–380       | 32      | 0,72     | 0,58             | 230       |   |
| РД-302   | 60                | 300                | 21               | 220–380       | 32      | 0,67     | 0,67             | 220       |   |
| РД-303   | 60                | 300                | 23               | 220–380       | 32      | –        | –                | 270       |   |
| Многопостовой сварочный (на шесть сварочных постов)<br>ВКСМ-1000 | 100               | 1000               | –                | 380           | 60      | 0,88     | 0,89             | 550       |   |
| Многопостовой<br>ВДМ-1601  | 1000              | 1600               | 122              | 380           | 60      | 0,88     | 0,8S             | 75С       | Питание сварочных постов дуговой сварки                       |

## 5.13. Компрессорные установки

## Технические данные воздушных компрессоров

Для привода мощных компрессоров применяются синхронные электродвигатели, для привода компрессоров малой производительности – асинхронные.

Здания воздушных компрессорных станций относятся к помещениям с нормальной средой. Электрооборудование для управления компрессорами в зависимости от конструктивных особенностей здания, способа управления и характеристики окружающей среды может располагаться в машинном помещении или в специальных электротехнических помещениях.

Управление компрессорными агрегатами может быть местным, автоматическим (в зависимости от давления в воздухохранилище-ресивере или от времени) или дистанционным (осуществляется диспетчером энергетического хозяйства предприятия). Современные компрессорные установки чаще всего автоматизируются. На диспетчерский пункт передаются только сигналы состояния работы компрессоров.

Технические данные воздушных компрессоров общепромышленного применения приведены в табл. 5.13.1.

Таблица 5.13.1

Технические данные компрессоров

| Компрессор |                             |                        |                         | Электродвигатель            |                      |                            |                      |
|------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| Тип        | Расход, м <sup>3</sup> /мин | Р, кгс/см <sup>2</sup> | n <sub>c</sub> , об/мин | поставляемый с компрессором |                      | рекомендуемый к применению |                      |
|            |                             |                        |                         | Тип                         | Р <sub>н</sub> , кВт | Тип                        | Р <sub>н</sub> , кВт |
| ВУ-3/8     | 3                           | 8                      | 1000                    | А2-81-6                     | 30                   | 4АН200М                    | 30                   |
| ВУ-3/4     | 3                           | 4                      | 1000                    | А2-72-6                     | 22                   | 4АН180М                    | 22                   |
| ВУ-6/4     | 6                           | 4                      | 1000                    | А2-81-6                     | 30                   | 4АН200М                    | 30                   |
| ВП-10/8    | 10                          | 8                      | 1500                    | А2-91-4                     | 75-                  | 4АН225М                    | 75                   |
| ВП-20/8    | 20                          | 8                      | 500                     | ДСК-12-24-12                | 125                  | –                          | –                    |
| ВП-30/8    | 30                          | 8                      | 500                     | ДСК-13-24-12                | 200                  | –                          | –                    |
| ВП-50/8М   | 50                          | 8                      | 375                     | ДСК-170-16-16М              | 300                  | –                          | –                    |
| 4М10-100/8 | 100                         | 8                      | 500                     | СТД 15-34-12                | 630                  | –                          | –                    |
| К-250-61-2 | 250                         | 8                      | 3000                    | СТД-1600-2                  | 1600                 | –                          | –                    |
| 2С2ВП10/8  | 10                          | 8                      | 750                     | А2-101-8В                   | 70                   | 4АН280                     | 75                   |
| 2С2ГП20/18 | 20                          | 18                     | 500                     | ДСК3-13-24-12               | 200                  | –                          | –                    |
| 2С5П30/8   | 30                          | 8                      | 500                     | ДСК-13-24-12                | 200                  | –                          | –                    |

## 5.14. Электрическое освещение

### 5.14.1. Рациональное использование освещения

Рациональная осветительная установка в производственном помещении характеризуется уровнем освещенности, качеством освещения и экономической целесообразностью.

Световая отдача и срок службы некоторых источников света приведены для сравнения в табл. 5.14.1.1.

## Характеристики источников света

| Источник света                  | Световая отдача, Вт | Срок службы, ч |
|---------------------------------|---------------------|----------------|
| Лампы накаливания 300 Вт, 220 В | 15,5                | 1000           |
| Люмин. лампы ЛБ-40              | 75                  | 10000          |
| Лампы ДРЛ-400                   | 55                  | 7500           |
| Светодиодная лампа 3–15 Вт      | 70–100              | 75000          |

Зрительное утомление вызывают:

- 1) наличие открытых ламп;
- 2) малая высота подвеса светильников;
- 3) пульсация светового потока у газоразрядных источников света.

Качество освещения снижается при наличии темных стен и потолков, а также вследствие образования резких теней на рабочем месте. При выборе типа окраски помещения и оборудования следует обязательно учитывать спектр источников света.

Экономический эффект может быть получен за счет использования рациональных схем осветительных установок, грамотной их эксплуатации и применения современных светотехнических изделий. Если заменить лампы накаливания люминесцентными или лампами типа ДРЛ, то, увеличив освещенность, например, в 2 раза (что выгодно благодаря повышению производительности труда), можно снизить расход электроэнергии на 20–40 %. Лампы накаливания используются в системе общего освещения (в помещениях, эпизодически посещаемых персоналом или характерных тяжелыми условиями: повышенная влажность, взрывоопасность) и в ряде случаев для местного освещения.

Существует предубеждение против одновременного использования естественного и искусственного света. Эта точка зрения ошибочна. В настоящее время получает распространение особая система освещения, при которой в частях помещений, удаленных от световых проемов, создается дополнительное искусственное освещение.

### 5.14.2. Обслуживание осветительных установок

В процессе эксплуатации осветительной установки:

- а) уровень освещенности помещений проверяется не реже одного раза в год;
- б) в сроки, определяемые ответственным за электрохозяйство, проверяется состояние осветительной установки и производится чистка ламп и осветительной арматуры.

Осмотр и проверка осветительной сети производятся в следующие сроки:

- а) испытание и измерение сопротивления изоляции проводов и кабелей – один раз в 3 года;



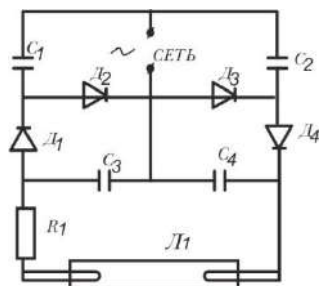


Рис. 5.14.4.1. Схема ремонта люминесцентной лампы

Устойчивое зажигание достигается при подаче напряжения, превышающего в  $4\sqrt{2}$  напряжение сети. Возникает ударная ионизация газа и лампа загорается. После зажигания конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$  работают как балластные сопротивления.

Параметры схемы для некоторых ламп приводятся в табл. 5.14.4.1.

Таблица 5.14.4.1

Параметры схемы

| $P_{л}$<br>Вт | $U_c$<br>В | $C_1, C_2$<br>мкФ | $C_3, C_4$<br>пФ | $D_1, D_2,$<br>$D_3, D_4$ | $R_1$<br>ом |
|---------------|------------|-------------------|------------------|---------------------------|-------------|
| 30            | 220        | 4,0               | 3300             | Д226Б                     | 60          |
| 40            | 220        | 10,0              | 6800             | Д226Б                     | 60          |
| 80            | 220        | 20,0              | 6800             | Д205                      | 30          |
| 100           | 220        | 20,0              | 6800             | Д205                      | 30          |

При неисправности дросселя и стартера вместо них можно использовать лампу накаливания и кнопку или балластное сопротивление и выключатель.

Можно включать последовательно две люминесцентные лампы с одной лампой накаливания. Например, при включении в сеть  $U = 220$  В последовательно двух люминесцентных ламп по 20 Вт требуется лампа накаливания 55 Вт.

### 5.14.5. Технические данные ламп накаливания, люминесцентных и ДРЛ

Лампы накаливания общего назначения выпускается на напряжения 127 и 220 В мощностью от 15 до 1500 Вт, для местного и переносного освещения на напряжения 12 и 36 В мощностью от 15 до 100 Вт. Наиболее употребительны цоколи:

- Р – резьбовой;
- 1Ш – штифтовый одноконтактный;
- 2Ш – штифтовый двухконтактный;
- СФ – софитный;

Ф – фокусирующий.

Световой поток ламп и их размеры приведены в табл. 5.14.5.1.

Таблица 5.14.5.1

Параметры ламп

| Тип лампы | F <sub>н</sub> , лм | Размеры, мм   |              |
|-----------|---------------------|---------------|--------------|
|           |                     | диаметр колбы | полная длина |
| B220-I5   | 105                 | 61            | 107          |
| B220-40   | 380                 | 61            | 114          |
| BK220-60  | 730                 | 51            | 96           |
| B220-100  | 1320                | 66            | 129          |
| Г220-150  | 2000                | 81            | 175          |
| Г220-200  | 2800                | 81            | 175          |
| Г220-300  | 4500                | 112           | 240          |
| Г220-500  | 8200                | 112           | 240          |
| Г220-750  | 13100               | 152           | 345          |
| Г220-1000 | 18500               | 152           | 345          |
| МО 12-15  | 200                 | 61            | 108          |
| МО12-25   | 380                 | 61            | 108          |
| МО36-40   | 500                 | 61            | 108          |
| МО36-60   | 800                 | 61            | 108          |
| МО36-100  | 1550                | 66            | 129          |
| ЗН5(300)  | 4300                | 180           | 267          |
| ЗН8(500)  | 6400                | 180           | 267          |

*Примечания:* 1. Лампы на напряжение 127–135 В и 220–235 В рекомендуются в случаях, когда напряжение в сети длительное время бывает выше номинального.

2. Обозначения ламп означают: В – вакуумная, Г – газонаполненная, Б – биспиральная, БК – биспиральная криптоновая, МТ – матированная, ОП – опалинового цвета, МЛ – молочного цвета.

3. Цифры означают напряжение (в вольтах) и мощность лампы в ваттах; у ламп ЗН5 и ЗН8 цифры в скобках означают мощность в ваттах.

Средний срок службы ламп накаливания 1000 часов.

Люминесцентные лампы общего назначения выпускаются мощностью 4, 6, 8, 10, 13, 15, 20, 30, 40, 65, 80, 110, 125, 150 и 200 Вт. Лампы мощностью от 15 до 30 Вт изготавливаются серийно в соответствии с ГОСТ 6825.

Технические данные ламп приведены в табл. 5.14.5.2.

Оптимальные световые характеристики ламп при температуре 20–25 °С. Наиболее высокие световые параметры у ламп типа ЛБ, наиболее низкие – у ЛДЦ. При температуре 4–5 °С зажигание люминесцентных ламп не гарантируется. Практически все типы люминесцентных ламп могут работать в цепи переменного и постоянного тока. Лампы ДРЛ (дуговые ртутные люминесцентные) излучают яркий свет, близкий к белому, имеют высокую светоотдачу (37–46 лм/Вт). Устойчивы к атмосферным воздействиям. Их

зажигание не зависит от температуры окружающей среды. При включении ламп ДРЛ наблюдается большой пусковой ток (до  $2,5 I_n$ ). Лампы типа ДРЛ выпускаются мощностью от 80 до 1000 Вт. Средняя продолжительность горения ламп ДРЛ составляет 7500 часов. Лампы ДРЛ применяются для освещения высоких цехов и для наружного освещения. Некоторые характеристики ламп ДРЛ приведены в табл. 5.14.5.3.

Таблица 5.14.5.2

Технические данные ламп

| Тип                      | $P_n$ , Вт | $U_n$ , В | $I_n$ , А | $F_n$ , лм | Размеры, мм   |                       |
|--------------------------|------------|-----------|-----------|------------|---------------|-----------------------|
|                          |            |           |           |            | Диаметр колбы | Длина колбы с цоколем |
| ЛДЦ,<br>ЛД, ЛХБ, ЛТБ, ЛБ | 15         | 54        | 0,33      | 500–760    | 27            | 437,4                 |
|                          | 20         | 57        | 0,37      | 820–1180   | 40            | 589,8                 |
|                          | 30         | 104       | 0,36      | 1450–2100  | 27            | 894,6                 |
|                          | 40         | 103       | 0,43      | 2100–3120  | 40            | 1199,4                |
|                          | 65         | 110       | 0,67      | 3050–4650  | 40            | 1500                  |
|                          | 80         | 102       | 0,865     | 3740–5220  | 40            | 1500                  |

*Примечания:* 1. В графе первое число – для ламп типа ЛДЦ, второе – для ЛБ.

2. Условное обозначение типа ламп: Л – люминесцентная, Б – белого света, Д – дневного света, ХБ – холодно-белого света, ТБ – тепло-белого света, Ц – с улучшенной цветопередачей; цифры – мощность, Вт. Например: ЛХБ80 – 80 Вт.

3. Средняя продолжительность горения ламп составляет не менее 12000 часов.

Таблица 5.14.5.3

Характеристики ламп ДРЛ

| Тип      | $P_n$ , Вт | $F_n$ , лм | Размеры, мм           |              |
|----------|------------|------------|-----------------------|--------------|
|          |            |            | Диаметр внешней колбы | Полная длина |
| ДРЛ-80   | 80         | 3200       | 81                    | 165          |
| ДРЛ-125  | 125        | 5600       | 91                    | 184          |
| ДРЛ 250  | 250        | 11000      | 91                    | 227          |
| ДРЛ-400  | 400        | 19000      | 122                   | 292          |
| ДРЛ-700  | 700        | 35000      | 152                   | 368          |
| ДРЛ-1000 | 1000       | 55000      | 181                   | 410          |

Дуговые ксеноновые трубчатые лампы ДКсТ изготавливаются на значительные мощности (до 100 кВт) и применяются для освещения больших пространств, строительных и монтажных площадок.

## 5.14.6. Расчет освещения

### 5.14.6.1. Расчет осветительной установки методом удельной мощности

Намечают количество светильников в помещении, исходя из их оптимального расположения. Расчетная мощность одной лампы:

$$P_{л} = \frac{\omega S}{n},$$

где  $S$  – площадь помещения,  $n$  – количество светильников;  $\omega$  – удельная мощность освещения, Вт/м<sup>2</sup>.

Затем выбирают ближайшую по мощности лампу. Если мощность её оказывается больше расчетной, то снова по установленной мощности  $\omega S$  пересчитывается количество светильников  $n$ .

При определении  $\omega S$  необходимо прибавлять потери мощности в пускорегулирующих аппаратах, которые составляют :

- 1) 30 % – для люминесцентных ламп, включенных по бесстартерной схеме;
- 2) 20 % – для люминесцентных ламп со стартерной схемой;
- 3) 10 % – для ламп ДРЛ.

Рекомендации по освещению некоторых помещений даны в табл. 5.14.6.1.1.

Таблица 5.14.6.1.1

#### Рекомендации по освещению помещений

| Помещения   | Минимальная освещенность, лк для общего, освещения | Удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup> |
|---|--|--------------------------------------|
| Механический цех <sup>1</sup>   | 30–50  |                                      |
| Кузнечный, пресовый, литейный <sup>2</sup><br>деревообделочные цехи, м/залы       | 50   | 11–15<br>12–15                       |
| Склады сырья и крупных изделий,<br>насосная, компрессорная,<br>коридоры, лестницы | 10   | 7                                    |
| Термический цех   | 35   | 8                                    |
| Аккумуляторные  | 25   | 10–12                                |
| Котельная   | 10–15  | 3,6                                  |
| Гаражи  | 10–25  | 9                                    |
| Канторские помещения <sup>3</sup>   | 50   | 12–14                                |
| Чертежная <sup>3</sup>  | 100  | 20–30                                |
| Машиносчетная станция, столовая   | 75   | 18–20                                |
| Общественные здания   | 50–75  | 18–25                                |

*Примечания:* 1. Освещенность для местного освещения составляет 300 лк.

2. В литейном цехе для освещения рабочего места формовщика должны быть предусмотрены переносные лампы.

3. Добавочно должны быть установлены настольные лампы.

**Пример 5.14.6.1.** Определить мощность и количество ламп дневного света для освещения конторского помещения при следующих данных: площадь освещения  $S = 66 \text{ м}^2$ , высота подвеса 2 м, напряжение сети 220 В, освещенность 200 лк.

**Решение**

1. Принимаем к установке светильники ПЛУ и располагаем их в два параллельных ряда по пяти в каждом, т.е.:

$$n = 5 \cdot 2 = 10.$$

2. По табл. 5.14.6.1 удельная мощность светильников  $\omega = 13 \text{ Вт/м}^2$ .

3. Мощность одного светильника:

$$P = \frac{\omega S}{n} = \frac{13 \cdot 66}{10} = 85,8 \text{ Вт.}$$

4. В каждом светильнике три лампы. Мощность каждой лампы:

$$P_{\Lambda} = \frac{85,8}{3} = 28,6 \text{ Вт.}$$

Следовательно, необходимо установить десять светильников типа ПЛУ с тремя лампами мощностью по 30 Вт.

### 5.14.6.2. Расчет сигнальных ламп

Сигнальные лампы применяют в системах автоматического управления электроприводами, технологическими линиями и т. д. Мощность сигнальных ламп принимается обычно 10, 15 и 25 Вт. Для увеличения их срока службы при колебаниях сетевого питания напряжение на сигнальных лампах не должно превышать  $(0,75-0,8) U_c$ .

Уменьшение напряжения на лампах обеспечивается включением добавочного (экономического) сопротивления (рис. 5.14.6.2.1), расчет которого осуществляется по известным формулам электротехники.

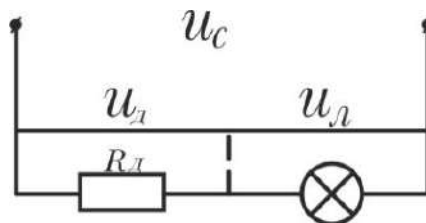


Рис. 5.14.6.2.1. Схема уменьшения напряжения на лампе

$$R_{\text{д}} = \frac{U_c - U_{\text{л}}}{I}, \text{ Ом,}$$

где  $U_c$  – напряжение сети, В;

$U_{\text{л}}$  – напряжение на лампе  $(0,75-0,8) U_c$ ;

$I$  – ток в цепи лампы, А.

Ток в цепи лампы равен:

$$I = \frac{U_{\Lambda}}{R_{\Lambda}}, \text{ А,}$$

где  $R_{\Lambda}$  – сопротивление лампы, определяемое из номинальных данных;

$$R_{\Lambda} = \frac{U_{\Lambda}^2}{P_{\Lambda}}, \text{ Ом,}$$

где  $P_{\Lambda}$  – мощность лампы, Вт.

**Пример 5.14.6.2.1.** Определить добавочное сопротивление в цепи лампы при следующих данных:

$$P_{\Lambda} = 15 \text{ Вт, } U_{\text{с}} = 220 \text{ В, } U_{\Lambda} = 0,75U_{\text{с}}.$$

**Решение**

1. Напряжение на лампе:

$$U_{\Lambda} = 0,75U_{\text{с}} = 0,75 \cdot 220 = 165 \text{ В.}$$

2. Сопротивление лампы:

$$R_{\Lambda} = \frac{U_{\Lambda}^2}{P_{\Lambda}} = \frac{220^2}{15} = 3220 \text{ Ом.}$$

3. Ток в цепи лампы:

$$I = \frac{U_{\Lambda}}{R_{\Lambda}} = \frac{165}{3220} = 0,051 \text{ А.}$$

4. Добавочное сопротивление в цепи лампы:

$$R_{\text{д}} = \frac{U_{\text{с}} - U_{\Lambda}}{I} = \frac{220 - 165}{0,051} = 1080 \text{ Ом.}$$

### 5.14.7. Энергоэффективные источники света

Преимущества светодиодных ламп очевидны:

- полная экологическая безопасность;
- высокий КПД (в 10 раз экономичнее ламп накаливания);
- огромный ресурс работы (более 50 000 часов);
- отсутствие эффекта мерцания;
- не требует специальной утилизации.

Одним из недостатков ламп на светодиодах является высокая цена. Единичный пробный выпуск обходится в 300–500 руб.

Примерами российских фирм-производителей ламп являются: ООО «Микросхема», ООО «Нано-свет», ООО «Альфа-свет» – г. Челябинск. Потребляемая мощность ламп составляет 3–15 Вт.

В настоящее время во всем мире практически отказались от применения ламп накаливания в учреждениях, уличном освещении, на предприятиях и в быту.

## 5.15. Аккумуляторные батареи

### 5.15.1. Обозначение и характеристика стартерных батарей

Аккумуляторные батареи на баках и перемычках имеют обозначения, характеризующие тип батарей. Например, 60Т-75ЭМ или 3ТСТ-150 ТМС обозначает следующее:

- 1) 6 или 3 – количество последовательно соединенных аккумуляторов в батарее и, следовательно номинальное напряжение батареи – 12 или 6 В;
- 2) СТ – стартерный тип батареи, ТСТ – тяжелая стартерная батарея для автомобилей, тракторов и других машин;
- 3) 75 или 150 – номинальная емкость батареи в ампер-часах при 20-часовом режиме разряда;
- 4) П, Э или Т – материал бака (пластмасса, эбонит, термопласт);
- 5) М – сепаратор аз мипласта, Р – мипора, П – пластипора, ПС – пластипора и стекловолока МС – мипласта и стекловолока.

Некоторые электрические характеристики кислотных стартерных аккумуляторных батарей приведены в табл. 5.15.1.1.

Таблица 5.15.1.1

Характеристики кислотных аккумуляторных батарей

| Тип               | При 10-часовом режиме разряда и средней температуре электролита 30 °С |                          | При стартерном режиме разряда и начальных температурах электролита, °С |                          |                                   |                          | Ток разряда, А |
|-------------------|---|--------------------------|--|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------|
|                   |   |                          | + 30 ± 2   |                          | -18 ± 2                           |                          |                |
|                   | ток, А  | номинальная емкость, А·ч | ток, А   | номинальная емкость, А·ч | начальное разрядное напряжение, В | номинальная емкость, А·ч |                |
| Напряжение – 12 В |   |                          |  |                          |                                   |                          |                |
| 6-СТ-45           | 4,5   | 45                       | 125  | 11,45                    | 7,7/8,1                           | 4,68                     | –              |
| 6-СТ-55           | 5,5   | 55                       | 160  | 14,6                     | 7,7/8,2                           | 6                        | 3,5            |
| 6-СТ-75           | 7,5   | 75                       | 205  | 18,7                     | 7,7/8,2                           | 7,6                      | 5-             |
| 6-СТЭ-130         | 11,6  | 112                      | 360  | 30                       | 7,7/8,2                           | 12,6                     | –              |

В знаменателе – для новых батарей.

*Примечания:* 1. Емкость батареи, определяемая 10-часовым режимом разряда, должна соответствовать:

– на 5-м цикле заряд-разряд не менее 90 % указанной;

– на 10-м цикле заряд-разряд – не менее 100 % указанной; для батарей с сепараторами, комбинированными со стекловолоком при температуре 0–2 °С допускаются минимальные длительности стартерного режима 5 мин (вместо 5,5 мин) и 4,5 мин (вместо 5 мин).

Ток и емкость разряда приведены для номинальной температуры электролита + 30 °С. Напряжение на элементе в конце заряда должно быть 2,7 В; плотность электролита 1,285–1,29 г/см<sup>3</sup>. От величины внутреннего сопро-

тивления батареи зависит максимальная сила тока в цепи статора при пуске двигателя. Например, внутреннее сопротивление заряженной аккумуляторной батареи ЗСТ-80 при плотности электролита 1,27 г/см<sup>3</sup> и температуре +40 °С составляет 0,01 Ом, а при – 20 °С увеличивается до 0,02 Ом.

### 5.15.2. Электролит

Электролит готовят из аккумуляторной серной кислоты (ГОСТ 667) и дистиллированной воды (ГОСТ 6709). Для надежной работы аккумуляторов необходима высокая степень чистоты электролита.

При составлении электролита серную кислоту льют тонкой струей в воду. Нельзя лить воду в кислоту, так как электролит будет разбрызгиваться из сосуда, что может вызвать ожоги тела. Составлять электролит следует в кислотостойкой (эбонитовой, фарфоровой или освинцованной) посуде. Стеклопосуда не выдерживает высокой температуры. Плотность электролита в зависимости от соотношения серной кислоты и дистиллированной воды приведена в табл. 5.15.2.1.

Таблица 5.15.2.1

Параметры электролита

| Требуемая плотность электролита, г/см <sup>3</sup> | На 1л электролита требуется |       |                           |
|--|-----------------------------|-------|---------------------------|
|  | серной кислоты              |       | дистиллированной воды, кг |
|  | л                           | кг    |                           |
| 1,22   | 0,199                       | 0,364 | 0,856                     |
| 1,24   | 0,219                       | 0,401 | 0,840                     |
| 1,25   | 0,228                       | 0,417 | 0,832                     |
| 1,27   | 0,248                       | 0,454 | 0,816                     |
| 1,28   | 0,258                       | 0,472 | 0,808                     |
| 1,30   | 0,279                       | 0,511 | 0,790                     |
| 1,31   | 0,289                       | 0,528 | 0,781                     |
| 1,34   | 0,320                       | 0,586 | 0,754                     |
| 1,40   | 0,380                       | 0,695 | 0,692                     |

Плотность электролита определяют при помощи денсиметра или ареометра. Новые аккумуляторы заливают электролитом плотностью на 0,02 г/см<sup>3</sup> меньше той, которая должна быть в конце заряда. В заряженных аккумуляторах плотность электролита, приведенная к +15 °С, не должна превышать величин, указанных в [30].

Таблица 5.15.2.2

Допустимая плотность электролита в заряженных аккумуляторах

| Район с температурой                  | Ниже -40 °С                  | до -40 °С | До -30 °С | до -15 °С |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Плотность, приведенная к t° = + 15 °С | 1,31 (зимой)<br>1,29 (летом) | 1,29      | 1,27      | 1,25      |

*Примечание.* Плотность электролита зависит от его температуры. На каждый градус изменения температуры в показаниях денсиметра следует вводить поправку, равную 0,0007, если температура выше +15 °С, поправку к показаниям денсиметра прибавляют, если ниже – вычитают.

### 5.15.3. Методы заряда аккумуляторных батарей

Различают следующие методы заряда аккумуляторных батарей:

- 1) ускоренный заряд при постоянном напряжении;
- 2) заряд при постоянной силе зарядного тока;
- 3) подзаряд батарей малой силой тока от 0,02 до 0,1 А (производят для компенсации саморазряда батарей при хранении их на складах, а также непосредственно на автомобилях при положительных температурах воздуха);
- 4) ускоренный заряд батарей в течение 2–3 часов, когда в течение первого часа батареи заряжают силой тока  $1/3$  от  $C_{\text{ном}}$  батареи, во второй час заряда силу тока уменьшают до  $1/6 C_{\text{ном}}$  и в третий час батареи заряжают силой тока  $1/20$  от  $C_{\text{ном}}$  батареи. Напряжение источника должно быть 7,2 В для заряда 6-вольтовых и 14,4 В для заряда – 12-вольтовых батарей из расчета 2,4 В на один аккумулятор. При таком напряжении не будет перезаряда батарей.

Основные достоинства заряда батарей при постоянном напряжении:

- 1) не возникает перезаряда батареи, так как по мере заряда ток постоянно уменьшается почти до нуля;
- 2) отпадает необходимость в регулировочных реостатах;
- 3) короткое время заряда (за 4–5 часов батарея заряжается на 90–95 % емкости).

Этот метод заряда аккумуляторных батарей широко применяется на автомобилях.

### 5.15.4. Расчет мощности зарядных устройств

Заряжают батареи обычно двумя способами:

– при постоянном напряжении (рис. 5.15.4.1);

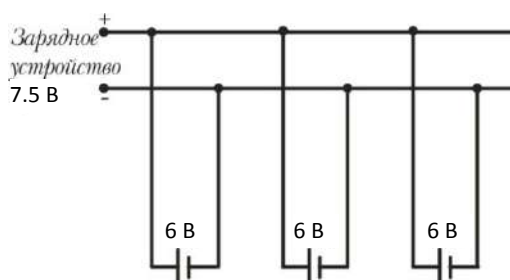


Рис. 5.15.4.1. Заряд батареи при постоянном напряжении

– при постоянной силе тока (рис. 5.15.4.2).

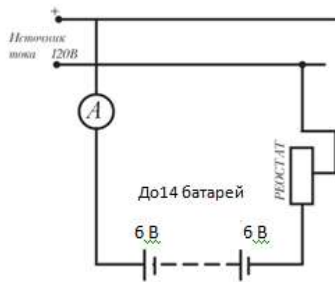


Рис. 5.15.4.2. Заряд батареи при постоянном токе

Сущность заряда при постоянной силе тока заключается в том, что батарею заряжают постоянным по силе током, который через определенный промежуток времени уменьшается вдвое (для свинцовых батарей при достижении напряжения 2,35–2,4 В на элемент).

Заряд при постоянном напряжении заключается в том, что аккумуляторные батареи подключают параллельно к зажимам зарядного устройства. Для 6-вольтных батарей напряжение сети должно быть равно 7,5 В. Наибольшее распространение получил заряд при постоянной силе тока. Мощность зарядного устройства для батарей, работающих в режиме заряд-разряд можно определить по формуле:

$$P = UI_3 \cdot 10^{-3} \text{ кВт},$$

где  $P$  – мощность зарядного устройства, кВт;

$U$  – напряжение сети зарядного устройства, В;

$I_3$  – суммарный зарядный ток, А.

Суммарный зарядный ток:

$$I_3 = I_1 + I_2 + \dots + I_n,$$

где  $I_1, I_2$  и т.д. – зарядный ток каждой группы батарей, А.

Совершенно ясно, что суммарный ток не должен быть больше номинального тока зарядного устройства. Зарядный ток батарей при различных режимах заряда можно принимать по табл. 5.15.4.1.

Таблица 5.15.4.1

Величина зарядного тока при различных режимах заряда

| Тип батарей | Режим заряда                            | Величина зарядного тока, А   |
|-------------|---|--|
| Кислотные   | Батареи, бывшие в эксплуатации          | $I_3 = C/10$ где $C$ – емкость, А · ч  |
|             | Новые батареи, не бывшие в употреблении | $I_3 = (0,7 \div 0,8) \cdot C/10$ для батарей типа С, СК, СП, СПК и стартерных |
|             | Сульфатированные батареи                | $I_3 = C/20$   |
|             | Подзаряд отстающих элементов            | $I_3 = C/20$   |
| Щелочные    | Нормальный заряд                        | $I_3 = C/4$  |
|             | Ускоренный заряд                        | $I_3 = C/2$  |

### 5.15.5. Неисправности аккумуляторных батарей

Аккумуляторные батареи имеют следующие основные неисправности

#### 1. Саморазряд

При эксплуатации и длительном хранении батарей каждый аккумулятор постепенно разряжается и теряет свою емкость даже при отсутствии нагрузки. Причины саморазряда следующие:

а) замыкание выводных штырей аккумуляторов грязью с электролитом, разлитым на поверхности крышек баков;

б) замыкание разноименных пластин осыпающейся активной массой при разрушении сепараторов;

в) образование местных (паразитных) токов в активной массе пластин;

г) загрязненность и неодинаковая плотность в различных слоях электролита. Если установлено, что саморазряд происходит из-за загрязнения электролита, то такую батарею нужно разрядить силой тока  $I_p = 0,1C_{ном}$  до напряжения  $U = 1,1 \div 1,2$  В на I элемент, чтобы посторонние металлы и их окислы перешли с активной массы отрицательных пластин в электролит. После этого вылить весь электролит, тщательно промыть все аккумуляторы дистиллированной водой, залить аккумуляторы свежим электролитом той же плотности, которую имел электролит до промывки, и полностью зарядить батарею.

#### 2. Сульфатация пластин и аккумулятора

Сульфатация пластин и аккумулятора происходит в случаях:

а) длительного хранения разряженной батареи;

б) увеличения плотности электролита;

в) саморазряда пластин;

г) повышения температуры электролита;

д) короткого замыкания пластин.

Сульфатированные пластины аккумуляторов исправляют продолжительными зарядами малой силы постоянного или пульсирующего тока (не более 0,05 от емкости аккумулятора) при низкой плотности электролита (не более 1,11 г/см<sup>3</sup>).

Сильно сульфатированные пластины не восстанавливают.

#### 3. Разрушение пластин в аккумуляторах

Разрушение пластин в аккумуляторах происходит большей частью при длительном перезаряде.

#### 4. Трещины стенок бака

Наличие трещин вызывает утечку электролита и сульфатацию пластин.

## 5.16. Электромеханизмы

### 5.16.1. Электромагниты постоянного тока серии ЭМ21

Основные параметры электромагнитов серии ЭМ21 представлены в табл. 5.16.1.1.

Таблица 5.16.1.1

Основные характеристики электромагнитов ЭМ 21

| Тип                                      | ПВ, %       | F кгс | T, с | Z <sub>max</sub> |
|--|-------------|-------|------|------------------|
| ЭМ21-035-55У3(Т3)<br>ЭМ21-035-55У4(Т4)   | 100<br>(40) | 1     |      | 2300             |
| ЭМ21-041-55У3 (Т3)<br>ЭМ21-041-55У4 (Т4) | 15          | 1,6   | 0,24 | 1200             |
| ЭМ21-045-55У3(Т3)<br>ЭМ21-045-55У4СТ4)   | 100<br>(40) | 1,6   |      | 2300             |
| ЭМ21-051-55У3 (Т3)<br>ЭМ21-051-55У4(Т4)  | 15          | 2,5   |      | 1200             |
| ЭМ21-055-55У3 (Т3)<br>ЭМ21-055-55У4(Т4)  | 100<br>(40) | 2,5   | 0,3  | 1800             |
| ЭМ21-061-55У3 (Т3)<br>ЭМ21-061-55У4(Т4)  | 15          | 4     |      | 800              |

*Примечания:* 1. Данная серия электромагнитов применяется для дистанционного управления исполнительными механизмами машин и станков в закрытых помещениях. Ход якоря 10 мм, исполнение по ограничению хода якоря 5 мм.

2. В скобках дана ПВ при максимально допустимом числе циклов в 1 час (Z<sub>max</sub>).

3. T – это время срабатывания при номинальном ходе якоря, в секундах.

### 5.16.2. Электромагниты постоянного тока серии КМП

Основные параметры электромагнитов серии КМП представлены в табл. 5.16.2.1.

Таблица 5.16.2.1

Основные характеристики электромагнитов серии КМП

| Тип   | Тяговое усилие (включая массу якоря). Н·м, при |           |            | Ход якоря, мм | Потребляемая мощность, Вт, при |           |            |
|-------|--|-----------|------------|---------------|--------------------------------|-----------|------------|
|       | ПВ = 25 %                                      | ПВ = 40 % | ПВ = 100 % |               | ПВ = 25 %                      | ПВ = 40 % | ПВ = 100 % |
| КМП-2 | 115  | 80        | 35         | 40            | 300                            | 190       | 75         |
| КМП-4 | 370  | 300       | 120        | 80            | 650                            | 450       | 170        |
| КМП-6 | 1000   | 720       | 330        | 120           | 1500                           | 950       | 375        |

### 5.16.3. Электромагниты однофазные переменного тока напряжением 127, 220, 380 и 500 В серии МИС

Некоторые данные электромагнитов переменного тока серии МИС приведены в табл. 5.16.3.1.

Таблица 5.16.3.1

#### Основные характеристики электромагнитов переменного тока серии МИС

| Габарит                             | Тип      | Исполнение | Тяговое усилие, кгс при ПВ % |     |
|-------------------------------------|----------|------------|------------------------------|-----|
|                                     |          |            | 100                          | 10  |
| <b>Максимальный ход якоря 15 мм</b> |          |            |                              |     |
| 0                                   | МИС-0100 | Тянущие    | 1                            | –   |
|                                     | МИС-0110 |            | –                            | 1,5 |
|                                     | МИС-0200 | Толкающие  | 1                            | –   |
|                                     | МИС-0210 |            | –                            | 1,5 |
| 1                                   | МИС-1100 | Тянущие    | 1,5                          | –   |
|                                     | МИС-1110 |            | –                            | 2,1 |
|                                     | МИС-1200 | Толкающие  | 1,5                          | –   |
|                                     | МИС-1210 |            | –                            | 2,1 |
| <b>Максимальный ход якоря 20 мм</b> |          |            |                              |     |
| 2                                   | МИС-2100 | Тянущие    | 2,1                          | –   |
|                                     | МИС-2110 |            | –                            | 3   |
|                                     | МИС-2200 | Толкающие  | 2,1                          | –   |
|                                     | МИС-2210 |            | –                            | 3   |
| 3                                   | МИС-3100 | Тянущие    | 3                            | –   |
|                                     | МИС-3110 |            | –                            | 4,2 |
|                                     | МИС-3200 | Толкающие  | 3                            | –   |
|                                     | МИС-3210 |            | –                            | 4,2 |
| <b>Максимальный ход якоря 25 мм</b> |          |            |                              |     |
| 4                                   | МИС-4100 | Тянущие    | 4,2                          | –   |
|                                     | МИС-4110 |            | –                            | 6   |
|                                     | МИС-4200 | Толкающие  | 4,2                          | –   |
|                                     | МИС-4210 |            | –                            | 6   |
| 5                                   | МИС-5100 | Тянущие    | 6                            | –   |
|                                     | МИС-5110 |            | –                            | 8,5 |
|                                     | МИС-5200 | Толкающие  | 6                            | –   |
|                                     | МИС-5210 |            | –                            | 8,5 |
| 6                                   | МИС-6100 | Тянущие    | 8,5                          | –   |
|                                     | МИС-6200 |            | 8,5                          | –   |
| 8                                   | МИС-8100 |            | 17                           | –   |
| 9                                   | МИС-9100 |            | 25                           | –   |

*Примечание.* Электромагниты серии МИС нашли применение для перемещения частей механизмов или обрабатываемых деталей в закрытых помещениях при температуре воздуха  $-15 \dots + 35 \text{ }^\circ\text{C}$ , а также в парах и брызгах масла (температура масла до  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Катушки износостойчивые.

### 5.16.4. Электромагниты переменного тока серии КМТ нормального исполнения

Некоторые данные электромагнитов переменного тока серии КМТ приведены в табл. 5.16.4.1.

Таблица 5.16.4.1

#### Основные характеристики электромагнитов серии КМТ

| Тип    | Тяговое усилие, Н·м | Максимальный ход якоря, мм | Допустимая частота включения в час при ПВ=40 % | Кажущаяся мощность, ВА |                    | Действительная мощность, Вт при втянутом якоре | Масса якоря, кг |
|--------|---------------------|----------------------------|--|------------------------|--------------------|--|-----------------|
|        |                     |                            |  | в момент включения     | при втянутом якоре |  |                 |
| КМТ-3А | 350                 | 50                         | 500  | 22500                  | 700                | 120  | 12,5            |
| КМТ-4А | 700                 | 50                         | 400  | 38000                  | 1900               | 400  | 24              |
| КМТ-6А | 1150                | 60                         | 350  | 85000                  | 3000               | 600  | 46              |
| КМТ-7А | 1140                | 80                         | 275  | 140000                 | 4400               | 750  | 52              |

### 5.16.5. Муфты электромагнитные серии ЭМ постоянного тока напряжением 24 В

Технические данные электромагнитных муфт приведены в табл. 5.16.5.1.

Таблица 5.16.5.1

#### Основные характеристики электромагнитных муфт серии ЭМ

| Тип   | Ток, А | Момент, Н·м | Габариты, мм | Масса, кг |
|-------|--------|-------------|--------------|-----------|
| ЭМ-14 | 0,39   | 10          | Ø75·53,5     | 1,2       |
| ЭМ-24 | 0,53   | 25          | Ø90·58,5     | 1,9       |
| ЭМ-34 | 0,76   | 63          | Ø110·63,5    | 3         |
| ЭМ-44 | 1,09   | 160         | Ø135·66      | 5         |
| ЭМ-54 | 1,25   | 400         | Ø175·76,5    | 9,7       |
| ЭМ-64 | 2,55   | 1000        | Ø220·106     | 25,5      |

*Примечания:* 1. Применяются для дистанционного сцепления и расцепления элементов кинематических цепей металлорежущих и других станков и механизмов. Работают в масляной среде.

2. Электромагнитные муфты типа ЭМ-12, ЭМ-22, ЭМ-32, ЭМ-42, ЭМ-52, ЭМ-62 по конструктивному оформлению состоят из электромагнитной системы и фрикционного устройства.

3. Широко применяются электромагнитные муфты типа ЭТМ, например ЭТМ-092, ЭТМ-102 и т.д.

4. При нестабильной работе электромагнитных муфт необходимо проверить:

- 1) напряжение питания;

2) отсутствие коротких и витковых замыканий, соответствие диаметра провода и числа витков паспортным данным (обычно после проведения ремонта);

3) контактные соединения;

4) состояние дисков, отсутствие искривлений и механических заеданий.

### 5.16.6. Муфты электромагнитные серии МПБ, ЭМ и ЭТМ

Технические параметры муфт приведены в табл. 5.16.6.1.

Таблица 5.16.6.1

Технические данные электромагнитных муфт

| Серия      | Передаваемый момент, Н·м  | Частота вращения, об/мин | Ток управления, А |
|------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|
|            | Порошковые                | бесконтактные            |                   |
| МПБ-63-2   | 6,3                       | 2000                     | 0,45              |
| МПБ-10-2   | 0,4                       | 2000                     | 0,18              |
| МПБ-0,63-2 | 0,063                     | 2000                     | 0,16              |
|            | Фрикционные многодисковые |                          |                   |
| ЭМ-12      | 16                        | 3000                     | 1,1               |
| ЭМ-42      | 160                       | 2000                     | 3,5               |
| ЭМ-62      | 1000                      | 1000                     | 16,2              |
| ЭТМ-012    | 2,5                       | 6000                     | 0,15              |
| ЭТМ-103    | 1000                      | 4000                     | 1,68              |
| ЭТМ-15     | 1600                      | 2500                     | 6,0               |

### 5.16.7. Контактные путевые выключатели

Технические параметры выключателей приведены в табл. 5.16.7.1.

Таблица 5.16.7.1

Технические данные контактных путевых выключателей

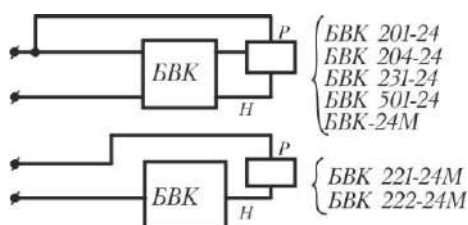
| Тип      | U, В      | I, А | Износостойкость  |                  | Рабочий угол поворота (ход) |
|----------|-----------|------|------------------|------------------|-----------------------------|
|          |           |      | механическая     | электрическая    |                             |
| ВК-200   | 380       | 6,3  | $5 \cdot 10^6$   | $10^6$           | 12°                         |
| ВК-300   | 220=      |      |                  |                  |                             |
| ВПК-1000 | 380; 220= | 4    | $1,6 \cdot 10^6$ | $10^6$           | 15° (1,7 мм)                |
| ВПК-2000 | 380; 220= | 6-4  | $10^7$           | $2,5 \cdot 10^6$ | 5,5-8 мм                    |
| ВПК-3000 | 380; 220= | 6    | $6,3 \cdot 10^6$ | —                | 12° (6,15 мм)               |
| ВПК-4000 | 380; 220= | 6-4  | $10^6$           | $2,5 \cdot 10^6$ | 5-9 мм                      |

### 5.16.8. Бесконтактные путевые переключатели серии БВК

Промышленность выпускает бесконтактные путевые переключатели серии БВК, предназначенные для контроля положения механизма:

- разброс величины путем срабатывания 0,2 мм;
- максимальная частота срабатывания 250 Гц;
- потребляемая мощность 0,5 Вт.

Схемы включения БВК приведены на рис. 5.16.8.1. В случае необходимости определения маркировки выводных проводов переключателей БВК-24М, БВК-201-24, БВК204-24, БВК231-24 производится с помощью ампер-вольтметра по шкале омметра.



5.16.8.1. Схемы включения БВК

При этом, когда омметр при присоединении его зажимов к двум выводным проводам переключателя показывает сопротивление порядка 250–500 Ом, то зажим омметра (общ) подключен к выводу «-» переключателя, а зажим «+» к выводу «Н» переключателя.

Расцветка выводных проводов БВК: «+» – красного цвета, «-» – белого цвета, Н – синего или зеленого цвета.

### 5.16.9. Электрогидравлические толкатели

Электрогидравлические толкателя применяются в качестве привода тормозных устройств. Они имеют независимый механизм, состоящий из электродвигателя и гидравлического насоса, расположенного в цилиндрическом корпусе. Внутри корпуса помещается цилиндр с поршнем и штоком, выходящим наружу из корпуса через сальник. Электродвигатель гидротолкателя работает в режиме ПВ 100 %. Технические данные гидротолкателей приведены в табл. 5.16.9.1.

Таблица 5.16.9.1

Технические данные гидротолкателей

| Тип     | Мощность электродвигателя, кВт | Частота вращения, об/мин | Рабочее усилие, Н | Ход штока, мм | Объем рабочей жидкости, л |
|---------|--------------------------------|--------------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| ТЭГ-16М | 0,15                           | 2850                     | 16                | 25            | 2,5                       |
| ТЭГ-25  | 0,2                            | 2850                     | 25                | 32            | 3,5                       |
| ТГМ-50  | 0,2                            | 2900                     | 50                | 50            | 3,5                       |
| ТГМ-80  | 0,2                            | 2850                     | 80                | 50            | 5,0                       |

## Глава 6. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

### 6.1. Показатели качества напряжения

#### 1. Отклонения напряжения

Отклонения напряжения  $V$  – разность между фактическим значением напряжения  $U$  и его номинальным значением для сети  $U_n$ , когда скорость изменения напряжения меньше 1 % в секунду:

$$V = U - U_n,$$

Если  $V$  выражается в процентах от  $U_n$ , а  $U$  и  $U_n$  – в вольтах или киловольтах, то:

$$V = \frac{U - U_n}{U_n} \cdot 100, \%$$

По действующим нормам допускаются следующие отклонения напряжения на зажимах приемников электроэнергии:

- для осветительных приемников в производственных и общественных помещениях от -2,5 до +5 %;
- для асинхронных электродвигателей от -5 до +10 %;
- во всех прочих случаях от -5 до +5 %.

#### 2. Колебание напряжения

Колебание напряжения  $V_t$  – разность между наибольшим  $U_{\max}$  и наименьшим  $U_{\min}$  действующими значениями напряжения, когда скорость изменения напряжения не меньше 1 % в секунду:

$$V_t = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} \cdot 100, \%$$

Кроме того, колебания напряжения ограничиваются частотой их возникновения (в первую очередь относится к осветительным сетям). Наиболее опасными для зрительного восприятия оказываются колебания с частотами в диапазоне от 1 до 10 Гц. При этом их величины ограничиваются значением порядка 1 %. При редких колебаниях допускаются значения порядка 1,5 % (до 10 раз в час) и более единичные. Допустимые значения колебаний напряжения определяются по следующей формуле:

$$V_t = 1 + \frac{6}{m} = 1 + \frac{\Delta t}{10}, \%$$

где  $m$  – частота колебаний в час;

$\Delta t$  – средний интервал между последовательными колебаниями, мин.

#### 3. Несимметрия напряжения

Несимметрия напряжений характеризуется относительными значениями (или в процентах) напряжений обратной:

$$U_2 = \frac{U_2}{U_n} \cdot 100,$$

и нулевой

$$U_0 = \frac{U_0}{U_n} \cdot 100$$

последовательностей.

Допустимое значение напряжения обратной последовательности на зажимах электродвигателей составляет величину порядка 2,5 % при коэффициенте загрузки двигателя  $K_3 = 0,7$ . Допустимые значения напряжений нулевой последовательности не установлены. Несимметрия напряжений приводит к появлению дополнительных потерь активной мощности и энергии в сети. Для снижения или устранения несимметрии напряжений или токов в электрической цепи нужны специальные дополнительные симметрирующие устройства. В некоторых случаях несимметрию напряжений удастся ликвидировать с помощью имеющихся батарей конденсаторов.

#### 4. Несинусоидальность напряжений

Несинусоидальность напряжений означает наличие наряду с гармоникой основной частоты  $U_1$  слагающих гармоник  $U_\gamma$  других высших кратных частот. В некоторых случаях показательным является действующее значение несинусоидального напряжения:

$$U = \sqrt{\sum_{\gamma=1}^{\infty} U_\gamma^2}.$$

С точки зрения условий работы приемников электроэнергии, несинусоидальность напряжений, т.е. состав гармоник, нормирована быть не может, так как действие гармоник происходит совместно с действием других влияющих факторов (например, несимметрии). Важно, чтобы суммарные отклонения напряжения на зажимах осветительных приборов не выходили за допустимые пределы и чтобы нагрев электродвигателей оставался в допустимых пределах.

## 6.2. Влияние режима напряжения на работу приемников электроэнергии

### 1. Асинхронные двигатели

При номинальном напряжении и полной нагрузке двигатель потребляет из сети активную  $P_n$  и реактивную  $Q_n$  мощности. В случае изменения напряжения  $U$  сети активная мощность на валу двигателя остается практически постоянной, изменяются лишь потери активной мощности в двигателе на некоторую величину  $\delta P$  в зависимости от величины изменения напряжения, типа двигателя и его коэффициента загрузки  $K_3$ .

При снижении напряжения  $U_1$  коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  недогруженного двигателя возрастает:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 I_1} = \frac{P_1}{\sqrt{3(I_0^2 + I_2'^2) \cdot U_1}},$$

где  $I_1$  – ток обмотки статора, равный геометрической сумме тока намагничивания машины и вторичного тока ротора  $I_2'$ .

При небольших снижениях  $U$  (не более  $0,8 U_H$ ) в результате снижения  $I_0 \equiv U^2$  – уменьшается  $I_1$ , что при  $P_2 = const$  приводит к эффективному повышению  $\cos \varphi_1$ . При большем изменении подводимого напряжения резко возрастает ток  $I_2'$ , а значит и ток  $I_1$ .

Если влияние частоты вращения двигателя на производительность механизмов имеет место, то напряжение на зажимах двигателей должно поддерживаться не ниже номинального при малых коэффициентах загрузки и в пределах до наибольшего допустимого значения при больших коэффициентах загрузки (близких к единице). При отсутствии влияния частоты вращения двигателя на производительность механизмов целесообразно поддерживать напряжение выше номинального при больших коэффициентах загрузки и ниже номинального – при малых коэффициентах загрузки.

Длительная работа в условиях пониженного напряжения снижает срок службы асинхронного двигателя. Для приближенной характеристики можно использовать зависимость относительного износа изоляции:

$$R = \frac{T_H}{T_{VM}},$$

где  $R$  – относительный износ изоляции;

$T_H$  – срок службы изоляции АД при  $U=U_H$  и номинальной его загрузке;

$T_{VM}$  – срок службы изоляции АД при отклонениях напряжения  $\mathcal{V}$  от номинального и  $K_3 = m$ .

Величина  $R$  при отклонениях напряжения в пределах  $|-0,2| \div |+0,2|U_H$  определится:

$$R = \begin{cases} (47\mathcal{V}^2 - 7,55\mathcal{V} + 1)m^2 & \text{при } -0,2 \leq \mathcal{V} < 0 \\ m^2 & \text{при } +0,2 \geq \mathcal{V} \geq 0. \end{cases}$$

Значения сопротивления при отклонениях напряжения и различных коэффициентах загрузки приведены в табл. 6.2.1.

Таблица 6.2.1

Значения  $R$  при отклонениях напряжения и различных коэффициентах загрузки АД

| Коэффициент загрузки $m$ | R при отклонениях напряжения |      |                                |
|--------------------------|------------------------------|------|--------------------------------|
|                          | -0,2                         | -0,1 | +0,2 $\geq \mathcal{V} \geq 0$ |
| 1                        | 4,4                          | 2,2  | 1                              |
| 0,75                     | 2,5                          | 1,25 | 0,55                           |
| 0,5                      | 1,1                          | 0,55 | 0,25                           |

## 2. Синхронные двигатели

В условиях работы с полной нагрузкой и при номинальном напряжении  $U_n$  двигатель СД характеризуется номинальными значениями потребляемой активной мощности  $P_n$ , потерями активной мощности  $\Delta P_n$  и располагаемой реактивной мощностью  $Q_{рс.н}$  (в режиме перевозбуждения).

## 3. Осветительные приемники

Снижение напряжения в осветительной сети приводит к уменьшению освещенности рабочих мест и, как следствие этого, к снижению производительности труда. Повышение напряжения в осветительной сети наносит значительный ущерб народному хозяйству страны из-за необходимости частой замены ламп, срок службы которых в этих условиях резко снижается. Влияние режима напряжения на световой поток  $F$ , потребляемую мощность  $P$  и срок службы  $T$  ламп накаливания приведено в табл. 6.2.2.

Таблица 6.2.2

Влияние режима напряжения на работу ламп накаливания

| $U$ лампы,<br>в долях $U_n$ | $P$ лампы<br>в долях $P_n$ | $F$ лампы,<br>в долях $F_n$ | $T$ лампы,<br>в % $T_n$ |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 0,9                         | 0,85                       | 0,7                         | 500                     |
| 0,95                        | 0,92                       | 0,84                        | 220                     |
| 1,0                         | 1,0                        | 1,0                         | 100                     |
| 1,05                        | 1,09                       | 1,18                        | 55                      |
| 1,1                         | 1,17                       | 1,37                        | 33                      |

Относительно небольшие отклонения напряжения на зажимах газоразрядных ламп (в пределах  $\pm 5 \div 7$  %) сравнительно мало сказываются на условиях их работы. При больших отклонениях эти условия резко ухудшаются.

## 4. Электротермические установки

Работа печей сопротивления, индукционных и дуговых печей при наличии отклонении напряжения от номинального значения затрудняется: снижается их производительность, нарушается технологический процесс, что приводит к значительному экономическому ущербу.

## 5. Выпрямительные установки

Ряд технологических процессов (например, электролиз) производится на постоянном токе. Для получения постоянного тока используются специальные выпрямительные установки. Для промышленных сетей переменного тока преобразователи и подстанции в совокупности с технологическим оборудованием постоянного тока являются потребителями электроэнергии. Качество напряжения в значительной степени влияет на работу таких потребителей.

При снижении напряжения уменьшается производительность, повышается удельный расход электроэнергии на 1 т выпускаемой продукции

и увеличивается её стоимость. Одновременно изменяются значения активной и реактивной мощностей, потребляемых установкой.

### 6.3. Особенности реактивной мощности

#### 1. Понятие реактивной мощности

Индуктивность является потребителем реактивной мощности ( $Q$ ), а емкость – генератором  $Q$ .

Суммирование реактивной мощности для нескольких элементов цепи не имеет смысла, так как не характеризует периодически протекающие процессы с достаточной полнотой. Появление реактивной мощности возможно в следующих случаях:

- при возникновении электрического или магнитного полей;
- при действии в цепи сдвинутых по фазе электродвижущих сил.

Умножение на время  $t$  значений  $Q$  и  $S$  не имеет смысла, так как не дает энергии (рис. 6.3.1).

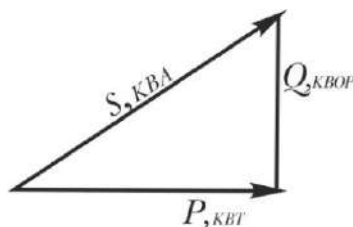


Рис. 6.3.1. Векторная диаграмма мощностей

#### 2. Потребление реактивной мощности

Активная мощность  $P$  в электрической сети количественно характеризует ход процесса электроснабжения потребителей.

Реактивная мощность  $Q$  потребляется и генерируется почти по всей сети (вынужденная генерация в случае емкости линий и намеренно компенсирующими устройствами).

Реактивная мощность теряется в большем количестве, чем потребляется нагрузками.

Потери активной мощности в сети составляют  $5 \div 10 \%$ .

#### 3. Передача реактивной мощности

С увеличением передаваемой по элементу сети  $Q$  возрастает ток:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U}.$$

При сопротивлении элемента сети ( $Z = const$ ) увеличиваются потери:

$$\Delta P = 3I^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R,$$

$$\Delta Q = 3I^2 x = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} x.$$

Увеличение  $\Delta P$  приводит к увеличению потери энергии. Увеличение передаваемой  $Q$  связано с увеличением  $\Delta U$ :

$$\Delta U = \frac{PR+Qx}{U} = \frac{PR}{U} \left(1 + \frac{x}{R} \operatorname{tg}\varphi\right).$$

#### 4. Баланс реактивной мощности

При проектировании электрической сети приходится сравнивать потребляемую  $Q$  с располагаемой. Но, наличие резерва  $Q$  в одном месте системы ещё не означает, что имеется возможность использования этого резерва в других местах. Наименьшее значение суммарной номинальной мощности определяется с учетом:

а) условия баланса  $Q$  (необходимость обеспечения определенного резерва её в характерных режимах в данном узле);

б) условия экономичности работы электрической системы.

Условие баланса  $Q$ :

$$Q_{pc} + Q_k \geq Q_{\Pi} + \Delta Q + Q_{pz},$$

где  $Q_{pc}$  – располагаемая  $Q$ ;

$Q_k$  – суммарная номинальная  $Q$  компенсирующих устройств;

$Q_{\Pi}$  – суммарная потребляемая  $Q$ ;

$\Delta Q$  – суммарные потери реактивной мощности;

$Q_{pz}$  – необходимая резервная  $Q$ .

#### 5. Источники реактивной мощности

К источникам реактивной мощности можно отнести:

- синхронные генераторы;
- синхронные двигатели и компенсаторы, работающие в режиме перевозбуждения;
- статические конденсаторы;
- управляемые статические источники реактивной мощности с искусственной коммутацией вентилей (рис. 6.3.2);
- кабельные и воздушные линии.

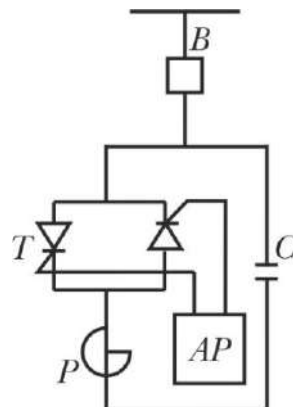


Рис. 6.3.2. Схема управления реактивной мощностью

## 6.4. Способы повышения коэффициента мощности токоприемников

### 1. Причины низкого коэффициента мощности

Основными причинами низкого коэффициента мощности являются:

- слабая загрузка асинхронных двигателей;
- слабая загрузка силовых трансформаторов;
- сварочные трансформаторы.

Реактивная мощность холостого хода асинхронных двигателей составляет:

$$Q_0 \approx 0,5 \div 0,7 Q_H.$$

При этом для АД с  $\cos \varphi_H = 0,91 \div 0,93$  мощность  $Q_0 \approx 0,5Q_H$ , а для АД с  $\cos \varphi_H = 0,77 \div 0,79$  мощность холостого хода  $Q_0 \approx 0,7 Q_H$ .

Коэффициент мощности холостого хода силовых трансформаторов составляет  $\cos \varphi_{0T} = 0,1-0,2$ . При снижении нагрузки с 0,4 до 0,2 коэффициент мощности уменьшается на 0,1, а при снижении нагрузки с 1 до 0,6 уменьшается на  $0,01 \div 0,02$ .

Коэффициент мощности сварочных трансформаторов составляет  $0,3 \div 0,5$ .

### 2. Последствия низкого коэффициента мощности.

1) увеличение потерь электроэнергии. Потери мощности пропорциональны квадрату тока, поэтому при снижении  $\cos \varphi$  с 0,9 до 0,7 (в 1,29 раз) потери мощности увеличатся в  $(0,9/0,7)^2 = 1,66$  раз;

2) увеличение сечения и веса кабелей и проводов;

3) увеличение мощности силовых генераторов и трансформаторов;

4) увеличение колебания напряжения.

### 3. Повышение коэффициента мощности токоприемников

1) правильный выбор электродвигателей по мощности и типу;

2) замена малозагруженных двигателей двигателями меньшей мощности.

При коэффициенте загрузки асинхронных двигателей  $K_3 < 0,45$  замена всегда целесообразна и расчеты не требуются. При  $K_3 > 0,7$  замена нецелесообразна. При загрузке двигателей в пределах от 45 до 70 % целесообразность замены их должна быть подтверждена достаточным уменьшением суммарных потерь активной мощности в электрической системе и двигателей.

Рассматривать вопрос о замене двигателей меньшими по мощности целесообразно только для двигателей, не встроенных в механизм. Замена малозагруженных двигателей, встроенных в механизм, настолько дорога и сложна, что она практически нецелесообразна.

**Пример 6.4.1.** Требуется проверить по условиям рентабельности замену двигателя типа А 92-4 мощностью 100 кВт, работающего с нагрузкой на валу  $P_2 = 50$  кВт, двигателем А 82-4 мощностью  $P_2 = 55$  кВт.

Параметры заменяемого двигателя:  $P_{2H} = 100$  кВт.

$$\cos \varphi_H = 0,89, \quad \eta_H = 0,92, \quad U_H = 380 \text{ В}, \quad I_0 = 57 \text{ А}, \\ \Delta P_0 = 3,5 \text{ кВт}, \quad K_{\text{ин}} = 0,1 \text{ кВт/кВАр}.$$

### Решение

Определяем:

$$Q_0 = \sqrt{3} U_H I_0 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 57 \cdot 10^{-3} = 37,5 \text{ кВАр}.$$

$$Q_H = \frac{P_H}{\eta_H} \operatorname{tg} \varphi_H = \frac{100}{0,92} \cdot 0,515 = 56 \text{ кВАр}.$$

$$K_3 = \frac{P}{P_H} = \frac{50}{100} = 0,5. \quad \gamma = \frac{\Delta P_0(\%)}{[(100 - \eta_H) - \Delta P_0]\%} = \frac{3,5}{(100 - 92) - 3,5} = 0,778.$$

$$\Delta P_{\text{ан}} = P_H \left( \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right) \left( \frac{1}{1 + \gamma} \right) = 100 \left( \frac{1 - 0,92}{0,92} \right) \left( \frac{1}{1 + 0,778} \right) = 4,89 \text{ кВт}.$$

$$\Delta P'_{\text{сум}} = [Q_0(1 - K_3^2) + K_3^2 Q_H] K_{\text{ин}} + \Delta P_0 + K_3^2 \Delta P_{\text{ан}} = \\ = [37,5(1 - 0,5^2) + 0,5^2 \cdot 56] \cdot 0,1 + 3,5 + 0,5^2 \cdot 4,89 = 9,13 \text{ кВт},$$

где  $K_{\text{ин}}$  – коэффициент изменения потерь;

$\Delta P_{\text{ан}}$  – прирост потерь активной мощности при  $K_3 = 1$ ;

$\gamma$  – коэффициент, зависящий от конструкции АД.

Параметры заменяющего двигателя:

$$P_{2H} = 55 \text{ кВт}, \quad \cos \varphi_H = 0,89, \quad \eta_H = 0,905, \\ U_H = 380 \text{ В}, \quad I_0 = 31,8 \text{ А}, \quad \Delta P_0 = 2,31 \text{ кВт}.$$

Определяем:

$$Q_0 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = 21 \text{ кВАр},$$

$$Q_H = \frac{55}{0,905} \cdot 0,515 = 31,3 \text{ кВАр},$$

$$K_3 = \frac{50}{55} = 0,91,$$

$$\gamma = \frac{4,2}{(100 - 90,5) - 4,2} = \frac{4,2}{5,3} = 0,793,$$

$$\Delta P_{\text{ан}} = 55 \left( \frac{1 - 0,905}{0,905} \right) \left( \frac{1}{1 + 0,793} \right) = 3,23 \text{ кВт},$$

$$P''_{\text{сум}} = [21(1 - 0,91^2) + 0,91^2 \cdot 31,3] \cdot 0,1 + 2,3 + 0,91^2 \cdot 3,23 = 7,95 \text{ кВт}.$$

Указанная замена приводит к уменьшению суммарных потерь активной мощности с 9,13 до 7,95 кВт, т.е. на 1,18 кВт.

### 3. Понижение напряжения у малозагруженных АД

А. Переключение статорной обмотки с  $\Delta$  на  $Y$  (табл. 6.4.1).

Указанное переключение можно рекомендовать для двигателей напряжением до 1000 В, систематически загруженных менее чем на 35–40 % от  $P_H$ . Ниже приведены зависимости коэффициентов полезного действия  $\eta Y / \eta \Delta$  в функции коэффициента загрузки  $K_3$  (табл. 6.4.2).

Таблица 6.4.1

Переключение статорной обмотки с  $\Delta$  на  $Y$ 

| $\cos \varphi_H$ АД | $\cos \varphi_Y / \cos \varphi_{\Delta}$ при $K_3$ |      |      |      |      |
|---------------------|--|------|------|------|------|
|                     | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  |
| 0,78                | 1,94   | 1,8  | 1,64 | 1,49 | 1,35 |
| 0,80                | 1,85   | 1,73 | 1,58 | 1,43 | 1,30 |
| 0,82                | 1,78   | 1,67 | 1,52 | 1,37 | 1,26 |
| 0,84                | 1,72   | 1,61 | 1,46 | 1,32 | 1,22 |
| 0,86                | 1,66   | 1,55 | 1,41 | 1,27 | 1,18 |
| 0,88                | 1,60   | 1,49 | 1,35 | 1,22 | 1,14 |
| 0,90                | 1,57   | 1,43 | 1,29 | 1,17 | 1,10 |
| 0,92                | 1,50   | 1,36 | 1,29 | 1,11 | 1,06 |

Таблица 6.4.2

## Зависимость КПД от коэффициента загрузки

| $\eta_Y / \eta_{\Delta}$ | 1,27 | 1,10 | 1,06 | 1,04 | 1,02 | 1,01 | 1,005 | 1,0 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-----|
| $K_3$                    | 0,1  | 0,2  | 0,25 | 0,3  | 0,35 | 0,4  | 0,45  | 0,5 |

При переключении двигателя с  $\Delta$  на  $Y$  максимальный вращающий момент уменьшается в 3 раза, поэтому необходимо производить проверку по предельному коэффициенту загрузки, определяемому условиями устойчивости:

$$K_{3\text{пр}} = \frac{K_M}{4,5},$$

где  $K_M = \frac{M_{\text{макс}}}{M_H}$  (по каталогам).

Б. Секционирование статорных обмоток АД.

В. Переключение ответвлений понижающего трансформатора.

## 6.5. Конденсаторные установки (КУ)

### 1. Защита КУ

Каждая КУ должна иметь общую защиту всей установки в целом от токов КЗ, осуществляемую в соответствии с ПУЭ. Выбор тока плавких вставок предохранителей для общей защиты КУ определяется по формуле:

$$I_B \leq 1,6n_{\text{общ}} \frac{Q_H}{\sqrt{3}U_L},$$

где  $n_{\text{общ}}$  – общее количество конденсаторов в установке, шт.;

$Q_H$  – номинальная мощность одного конденсатора, кВАр;

$U_L$  – линейное напряжение сети, кВ.

Автоматический выключатель должен иметь комбинированный расцепитель, обеспечивающий защиту от перегрузки и максимальную защиту с плавной регулировкой тока. Уставка тока максимального токового реле или расцепителя автомата не должна превышать 130 % номинального тока КУ.

**Пример 6.5.1.** Для КУ напряжением 380 В, состоящей из шести конденсаторов по 13 кВАр, ток плавкой вставки предохранителей общей защиты установки:

$$I_B = 1,6 \cdot 6 \frac{13}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 190 \text{ А.}$$

Ток уставки токового реле:

$$I_y = 1,3 \cdot 6 \frac{13}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 154 \text{ А.}$$

Защита КУ в осветительных сетях осуществляется тем же автоматом, что и вся сеть, к которой подключена КУ. При присоединении КУ непосредственно к электроприемнику защита её осуществляется защитой электроприемника.

2. Технические данные конденсаторов (табл. 6.5.1 и 6.5.2).

Таблица 6.5.1

Технические данные конденсаторов до 1000 В на частоту 50 Гц

| Тип конденсатора       | Номинальное напряжение, кВ | Номинальная мощность, кВАр | Номинальная емкость, мкФ | Высота, мм |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|------------|
| Конденсаторы 1-й серии |                            |                            |                          |            |
| КМ1-0,22-4,5-3У3       | 0,22                       | 4,5                        | 296                      | 404        |
| КМ1-0,38-13-3У3        | 0,38                       | 13                         | 286                      | 404        |
| КМ1-0,66-13-3У3        | 0,66                       | 13                         | 95                       | 418        |
| КМ2-0,22-9-3У3         | 0,22                       | 9                          | 592                      | 719        |
| КМ2-0,38-26-3У3        | 0,38                       | 26                         | 572                      | 719        |
| КМ2-0,66-26-3У3        | 0,66                       | 26                         | 190                      | 733        |
| Конденсаторы 2-й серии |                            |                            |                          |            |
| КС1-0,22-6-3У3         | 0,22                       | 6                          | 395                      | 404        |
| КС1-0,38-18-3У3        | 0,38                       | 18                         | 397                      | 404        |
| КС1-0,66-20-3У3        | 0,66                       | 20                         | 146                      | 418        |
| КС1-0,22-6-3У1         | 0,22                       | 6                          | 395                      | 466        |
| КС1-0,38-14-3У1        | 0,38                       | 14                         | 309                      | 466        |
| КС1-0,66-16-3У1        | 0,66                       | 16                         | 117                      | 466        |
| КС2-0,22-12-3У3        | 0,22                       | 12                         | 790                      | 719        |
| КС2-0,38-36-3У3        | 0,38                       | 36                         | 794                      | 725        |
| КС2-0,66-40-3У3        | 0,66                       | 40                         | 292                      | 733        |
| КС2-0,22-12-3У1        | 0,22                       | 12                         | 79,0                     | 781        |
| КС2-0,38-28-3У1        | 0,38                       | 28                         | 618                      | 787        |
| КС2-0,66-32-3У1        | 0,66                       | 32                         | 234                      | 781        |
| Конденсаторы 3-й серии |                            |                            |                          |            |
| КСХ-0,22-8-3У3         | 0,22                       | 8                          | 526                      | 410        |
| КС1-0,38-25-3У3        | 0,38                       | 25                         | 551                      | 410        |
| КС1-0,66-25-3У3        | 0,66                       | 25                         | 183                      | 418        |
| КС1-0,22-8-3У1         | 0,22                       | а                          | 526                      | 472        |
| КС1-0,38-20-3У1        | 0,38                       | 20                         | 441                      | 472        |
| КС1-0,66-20-3У1        | 0,66                       | 20                         | 146                      | 466        |
| КС2-0,22-16-3У3        | 0,22                       | 16                         | 1052                     | 725        |
| КС2-0,38-50-3У3        | 0,38                       | 50                         | 1102                     | 725        |
| КС2-0,66-50-3У3        | 0,66                       | 50                         | 366                      | 739        |

Окончание табл. 6.5.1

| Тип конденсатора       | Номинальное напряжение, кВ | Номинальная мощность, кВАр | Номинальная емкость, мкФ | Высота, мм |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|------------|
| Конденсаторы 3-й серии |                            |                            |                          |            |
| КС2-0,22-16-3У1        | 0,22                       | 16                         | 1052                     | 787        |
| КС2-0,38-40-3У1        | 0,38                       | 40                         | 882                      | 787        |
| КС2-0,66-40-3У1        | 0,66                       | 40                         | 292                      | 787        |
| Конденсаторы 4-й серии |                            |                            |                          |            |
| КСО-0,22-4-3У3         | 0,22'                      | 4                          | 260                      | 265        |
| КСО-0,22-4-3У1         | 0,22                       | 4                          | 260                      | 327        |
| КСО-0,38-12,5-3У3      | 0,33                       | 12,5                       | 276                      | 265        |
| КСО-0,38-12,5-3У1      | 0,38                       | 12,5                       | 276                      | 327        |
| КСО-0,86-12,5-3У3      | 0,66                       | 12,5                       | 92                       | 279        |
| КСО-0,66-12,5-3У1      | 0,66                       | 12,5                       | 92                       | 327        |

Таблица 6.5.2

Технические данные конденсаторов выше 1000 В на частоту 50 Гц

| Тип конденсатора       | Номинальное напряжение, кВ | Номинальная мощность, кВАр | Номинальная емкость, мкФ | Высота, мм |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|------------|
| Конденсаторы 1-й серии |                            |                            |                          |            |
| КМ1-6,3-13-2У3         | 6,3                        | 13                         | 1,0                      | 471        |
| КМ1-10,5-13-2У3        | 10,5                       | 13                         | 0,4                      | 526        |
| КМ1-6,3-12-2У1         | 6,3                        | 12                         | 1,0                      | 506        |
| КМ1-10,5-12-2У1        | 10,5                       | 12                         | 0,35                     | 546        |
| КМ2-6,3-26-3У3         | 6,3                        | 26                         | 2,1                      | 736        |
| КМ2-10,5-26-2У3        | 10,5                       | 26                         | 0,8                      | 841        |
| КМ2-6,3-24-2У1         | 6,3                        | 24                         | 1,9                      | 821        |
| КМ2-10,5-24-2У1        | 10,5                       | 24                         | 0,7                      | 861        |
| Конденсаторы 3-й серии |                            |                            |                          |            |
| КС1-6,3-37,5-2У3       | 6,3                        | 37,5                       | 3                        | 471        |
| КС1-10,5-37,5-2У3      | 10,5                       | 37,5                       | 1                        | 526        |
| КС1-6,3-30-2У1         | 6,3                        | 30                         | 2                        | 506        |
| КС1-10,5-30-2У1        | 10,5                       | 30                         | 1                        | 546        |
| КС2-6,3-75-2У3         | 6,3                        | 75                         | 6                        | 786        |
| КС2-10,5-75-2У3        | 10,5                       | 75                         | 2                        | 841        |
| КС2-6,3-60-2У1         | 6,3                        | 60                         | 5                        | 821        |
| КС2-10,5-60-2У1        | 10,5                       | 60                         | 2                        | 861        |
| Конденсаторы 4-й серии |                            |                            |                          |            |
| КСО-6,3-25-2У3         | 6,3                        | 25                         | 3                        | 331        |
| КСО-6,3-25-2У1         | 6,3                        | 25                         | 2                        | 367        |
| КСО-10,5-25-2У3        | 10,5                       | 25                         | 1                        | 395        |
| КСО-10,5-25-2У1        | 10,5                       | 25                         | 1                        | 405        |
| КС1-6,3-50-2У3         | 6,3                        | 50                         | 4                        | 471        |
| КС1-10,5-50-2У3        | 10,5                       | 50                         | 1,45                     | 526        |
| КС1-6,3-37,5-2У1       | 6,3                        | 37,5                       | 3                        | 506        |
| КС1-10,5-37,5-2У1      | 10,5                       | 37,5                       | 1,1                      | 546        |
| КС2-6,3-100-2У3        | 6,3                        | 100                        | 8                        | 786        |
| КС2-10,5-100-2У3       | 10,5                       | 100                        | 2,9                      | 841        |
| КС2-6,3-75-2У1         | 6,3                        | 75                         | 6                        | 821        |
| КС2-10,5-75-2У1        | 10,5                       | 75                         | 2,2                      | 861        |

## Глава 7. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

### 7.1. Рубильники, переключатели и пакетные выключатели

Рубильники, переключатели и пакетные выключатели (табл. 7.1.1) применяются для электрических цепей постоянного тока напряжением до 440 В и переменного тока частотой 50 Гц напряжением до 500 В.

Таблица 7.1.1

Технические данные рубильников и переключателей

| Рубильники   | Переключатели                                      | $I_n$ , А         | Способ соединения |
|--|--|-------------------|-------------------|
| Р 21, Р 31<br>Р 22, Р 32<br>Р 24, Р 34             | П 21, П 31<br>П 22, П 32<br>П 24, П 34             | 100<br>250<br>400 | Переднее и заднее |
| РБ 21, РБ 31<br>РБ 22, РБ 32<br>РБ 24, РБ 34       | ПБ 21, ПБ 31<br>ПБ 22, ПБ 32<br>ПБ 24, ПБ 34       | 100<br>250<br>400 | Переднее          |
| РПБ 21, РПБ 31<br>РПБ 22, РПБ 32<br>РПБ 24, РПБ 34 | ППБ 21, ППБ 31<br>ППБ 22, ППБ 32<br>ППБ 24, ППБ 34 | 100<br>250<br>400 | –                 |
| РПЦ 21<br>РПЦ 22<br>РПЦ 24                         | ППЦ 21<br>ППЦ 22<br>ППЦ 24                         | 100<br>250<br>400 | –                 |

*Примечания:* 1. Рубильники (Р) и переключатели (П) предназначены для отключения электрических цепей без нагрузки.

2. Рубильники с боковой рукояткой (РБ), с боковым рычажным приводом (РПБ), с центральным рычажным приводом (РПЦ), а также соответствующие переключатели ПБ, ППБ, ППЦ предназначены для коммутации электрических цепей под нагрузкой в пределах 50–100 % номинального тока в зависимости от рода и величины напряжений.

Первая цифра после букв определяет количество полюсов (1, 2 и 3), вторая – номинальный ток рубильника: 1 (100 А), 2 (250 А), 4 (400 А), 6 (600 А). Например, РПЦ 22 означает: рубильник с центральным рычажным приводом, двухполюсный, номинальный ток 250 А.

Основные параметры рубильников, пакетных выключателей и переключателей-разъединителей приведены в табл. 7.1.2.

Таблица 7.1.2

Технические данные рубильников,  
пакетных выключателей и переключателей-разъединителей

| Наименование  | Тип                                   | U, В | I <sub>н</sub> , А |            | Число полюсов |     |   |
|---|---------------------------------------|------|--------------------|------------|---------------|-----|---|
|   |                                       |      | пост.              | переменный |               |     |   |
| Рубильники-разъединители с приводом от маховика     | Р 2124/2                              | 500  | 800                | 800        | 2             |     |   |
|   | Р 2324/2                              |      | 1500               | 1500       | 2             |     |   |
|   | Р 2523/2                              |      | 3000               | 2500       | 2             |     |   |
|   | Р 2723/2                              |      | 5000               | 4000       | 2             |     |   |
|   | Р 2126/2                              |      | 800                | 800        | 3             |     |   |
|   | Р 2326/2                              |      | 1500               | 1500       | 3             |     |   |
|   | Р 2525/2                              |      | 3000               | 2500       | 3             |     |   |
|   | Р 2725/2                              |      | 5000               | 4000       | 3             |     |   |
| Пакетные выключатели                                | ПВМ 1-10                              | 220  | 6,3                | 4          | 1             |     |   |
|   | ПВМ 2-10                              | 380  | 10                 | 6,3        | 2             |     |   |
|   | ПВМ 2-25                              |      | 25                 | 16         | 2             |     |   |
|   | ПВМ 2-60                              |      | 60                 | 40         | 2             |     |   |
|   | ПВМ 2-100                             |      | 100                | 63         | 2             |     |   |
|   | ПВМ 2-250                             |      | 250                | 160        | 2             |     |   |
|   | ПВМ 2-400                             |      | 400                | 250        | 2             |     |   |
|   | ПВМ 3-10                              |      | 10                 | 6,3        | 3             |     |   |
|   | ПВМ 3-25                              |      | 25                 | 16         | 3             |     |   |
|   | ПВМ 3-60                              |      | 63                 | 40         | 3             |     |   |
|   | ПВМ 3-100                             |      | 100                | 63         | 3             |     |   |
|   | ПВМ 3-250                             |      | 250                | 160        | 3             |     |   |
|   | ПВМ 3-400                             |      | 400                | 250        | 3             |     |   |
| Переключатели-разъединители с центральной рукояткой | П 11                                  |      | 100                | 100        | 1             |     |   |
|   | П 12                                  |      | 250                | 250        | 1             |     |   |
|   | П 16                                  |      | 600                | 600        | 1             |     |   |
|   | П 21                                  |      | 100                | 100        | 2             |     |   |
|   | П 22                                  |      | 250                | 250        | 2             |     |   |
|   | П 24                                  |      | 400                | 400        | 2             |     |   |
|   | П 26                                  |      | 600                | 600        | 2             |     |   |
|   | П 31                                  |      | 100                | 100        | 3             |     |   |
|   | П 32                                  |      | 250                | 250        | 3             |     |   |
|   | П 34                                  |      | 400                | 400        | 3             |     |   |
|   | То же с центральным рычажным приводом |      | ППЦ-31             |            | 100           | 100 | 3 |
|   |                                       |      | ППЦ-32             |            | 250           | 250 | 3 |
|   |                                       |      | ППЦ-34             |            | 400           | 400 | 3 |
| Переключатели-разъединители с центральной рукояткой | П 2111/2                              |      | 800                | 800        | 1             |     |   |
|   | П 2311/2                              |      | 1500               | 1500       | 1             |     |   |
|   | П 2511/2                              |      | 3000               | 2500       | 1             |     |   |

## 7.2. Предохранители

Номинальный ток плавкой вставки для АД определяется из двух условий:

а) по  $I_n$  двигателя;

б) по току  $I_{\text{п}}$  двигателя:

$$I_{\text{нв}} \geq \alpha I_{\text{н}}, \quad I_{\text{нв}} \geq I_{\text{п}}/\beta,$$

где  $I_{\text{н}}, I_{\text{п}}$  – номинальный и пусковой токи двигателя;

$\alpha$  – коэффициент, характеризующий режим работы двигателя;

$\alpha = 1$  – при длительном режиме работы;  $\alpha = 1,25$  – при повторно кратковременном режиме работы;

$\beta$  – коэффициент, характеризующий условия пуска.

При легких и нормальных условиях пуска, когда разгон двигателя длится не более 5–10 с, принимают  $\beta = 2,5$ ; при тяжелых условиях пуска  $\beta = 1,6 - 2,0$ .

Пусковой ток двигателя:

$$I_{\text{п}} = K_{\text{п}} I_{\text{н}},$$

где  $K_{\text{п}}$  – кратность пускового тока (для АД с короткозамкнутым ротором  $K_{\text{п}} = 5 \div 8$ , для сварочных аппаратов и печных трансформаторов  $K_{\text{п}} = 3$ ).

Плавкие вставки предохранителей, от которых получает питание группа двигателей, выбирают из двух условий:

а) по наибольшему длительному току:

$$I_{\text{нв}} \geq \Sigma I_{\text{н}};$$

б) по наибольшему пусковому току, например, для нормальных условий пуска:

$$I_{\text{в}} \geq \frac{\Sigma I_{\text{н}} + (I_{\text{п}} - I_{\text{н}})}{2,5},$$

где  $\Sigma I_{\text{н}}$  – сумма номинальных токов одновременно работающих двигателей;

$I_{\text{н}}, I_{\text{п}}$  – разность между пусковым и номинальным токами для двигателя, у которого она имеет наибольшую величину.

Если пускается одновременно несколько двигателей, то в формулу подставляется сумма величин  $(I_{\text{п}} - I_{\text{н}})$  этих двигателей. Технические данные предохранителей приведены в табл. 7.2.1.

Таблица 7.2.1

Технические данные предохранителей

| Тип           | $I_{\text{н}}, \text{А}$ | $U_{\text{н}}, \text{В}$ | Предельный ток отключения, кА |
|---------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| ППД 12-43133  | 1600                     | 150                      | 100                           |
| ППД 12-49433  | 6300                     | 450                      | 200                           |
| ПП 51-3340354 | 160                      | 380                      | –                             |
| ПП 41         | 31–630                   | 660                      | 100                           |

Стандартные плавкие вставки имеют следующие номинальные токи: 4, 6, 10, 15, 20, 25, 35, 45, 60, 80, 100, 125, 160, 200, 225, 260, 300, 350, 430, 500, 600, 700, 850, 1000 А.

Основные параметры предохранителей приведены в табл. 7.2.2.

Таблица 7.2.2

Технические данные предохранителей

| Тип     | $U_n, В$     | $I_n, А$       |                               | Предельный ток отключения, кА при напряжении переменного тока $U = 380 В$ |
|---------|--------------|----------------|-------------------------------|---|
|         |              | предохранителя | плавкой вставки               |   |
| НПН-60  | ~500         | 60             | 6, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60 | 10  |
| ПНЧ-100 | ~500<br>=220 | 100            | 30, 40, 50, 60, 80, 100       | 100   |
| ПНЧ-250 |              | 250            | 80, 100, 120, 150, 200, 250   | 100   |
| ПНЧ-400 |              | 400            | 200, 250, 300, 400            | 40  |
| ПНЧ-600 |              | 600            | 300, 400, 500, 600            | 25  |
| ПП17-39 | ~500<br>=440 | 1000           | 500, 630, 800, 1000           | 110   |
| ПР-2    | ~380<br>=440 | 15             | 6, 10, 15                     | 0,8   |
|         |              | 60             | 15, 20, 25, 34, 45, 60        | 1,8   |
|         | ~500<br>=440 | 100            | 60, 80, 100                   | 6   |
|         |              | 200            | 100, 125, 160, 200            | 6   |
|         |              | 350            | 200, 225, 260, 300, 350       | 6   |
|         | 600          | 600            | 350, 430, 500, 600            | 13  |
|         |              | 1000           | 600, 700, 850, 1000           | 15  |

Перегоревшие плавкие вставки следует заменять запасными, заводской калибровки. Если таких нет, их можно временно заменить заранее подготовленными проволочками, рассчитанными на определенный ток (по данным табл. 7.2.3).

В табл. 7.2.4. приведены параметры медной проволоки для плавких вставок пластинчатых и трубчатых предохранителей.

В табл. 7.2.5 приведены параметры медной проволоки для плавких вставок пробочных предохранителей.

Таблица 7.2.3

## Выбор диаметра проволоки для плавких вставок

| Исполнение  | Тип предохранителя | Номинальный ток патрона, А | Номинальный ток плавкой вставки, А | Диаметр проволоки, мм | Число параллельно включенных проволок |
|---|--------------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Патрон закрытый, разборный (фибровый) без наполнителя                                     | ПР-2               | 15                         | 6                                  | 0,25                  | 1                                     |
|   |                    |                            | 10                                 | 0,35                  | 1                                     |
|   |                    |                            | 15                                 | 0,45                  | 1                                     |
|   |                    | 60                         | 20                                 | 0,55                  | 1                                     |
|   |                    |                            | 25                                 | 0,6                   | 1                                     |
|   |                    |                            | 35                                 | 0,75                  | 1                                     |
|   |                    |                            | 45                                 | 0,9                   | 1                                     |
|   |                    |                            | 60                                 | 1,0                   | 1                                     |
|   |                    |                            | 100                                | 0,8                   | 2                                     |
|   |                    |                            | 100                                | 1,0                   | 2                                     |
|   |                    | 200                        | 125                                | 1,1                   | 2                                     |
|   |                    |                            | 160                                | 0,9                   | 3                                     |
|   |                    |                            | 200                                | 1,15                  | 3                                     |
| 350   | 300                | 1,2                        | 4                                  |                       |                                       |
|   | 350                | 1,3                        | 4                                  |                       |                                       |
| Патрон закрытый разборный (фарфоровый) с наполнителем из мелкозернистого кварцевого песка | НПР-100            | 100                        | 160                                | 0,55                  | 4                                     |
|   |                    |                            | 80                                 | 0,47                  | 6                                     |
|   | НПР-200            | 200                        | 100                                | 0,60                  | 6                                     |
|   |                    |                            | 100                                | 0,6                   | 6                                     |
|   |                    |                            | 125                                | 0,6                   | 8                                     |
|   |                    |                            | 160                                | 0,6                   | 10                                    |
|   |                    |                            | 160                                | 0,6                   | 10                                    |
|   |                    |                            | 200                                | 0,6                   | 12                                    |

*Примечание.* В качестве плавких вставок применяют медную луженую проволоку. Если пользуются несколькими параллельно включенными проволоками, скручивать их нельзя.

Таблица 7.2.4

## Диаметр медной проволоки для плавких вставок

| Диаметр, мм | Номинальный ток (А) при длине (мм) |               |          |               |
|-------------|------------------------------------|---------------|----------|---------------|
|             | в воздухе                          |               | в трубах |               |
|             | 100 мм                             | 150 мм и выше | 100 мм   | 150 мм и выше |
| 0,25        | 6,0                                | 7,6           | 5,3      | 6,7           |
| 0,27        | 7,4                                | 8,5           | 6,5      | 7,5           |
| 0,29        | 8,1                                | 9,4           | 7,1      | 8,3           |
| 0,31        | 9,2                                | 10,3          | 8,1      | 9,1           |
| 0,33        | 10,2                               | 11,3          | 9,0      | 10,0          |
| 0,35        | 10,8                               | 12,2          | 9,5      | 10,7          |
| 0,38        | 12,8                               | 13,8          | 11,3     | 12,1          |
| 0,41        | 14,4                               | 15,3          | 12,7     | 13,5          |

| Диаметр,<br>мм | Номинальный ток (А) при длине (мм) |               |          |               |
|----------------|------------------------------------|---------------|----------|---------------|
|                | в воздухе                          |               | в трубах |               |
|                | 100 мм                             | 150 мм и выше | 100 мм   | 150 мм и выше |
| 0,44           | 16,1                               | 16,8          | 14,2     | 14,3          |
| 0,47           | 17,8                               | 17,5          | 15,7     | 16,3          |
| 0,49           | 19,1                               | 19,6          | 16,8     | 17,2          |
| 0,51           | 20,3                               | 20,8          | 17,9     | 18,3          |
| 0,53           | 21,6                               | 21,9          | 19,0     | 19,3          |
| 0,55           | 22,9                               | 23,0          | 20,1     | 20,2          |
| 0,57           | 24,2                               | 24,3          | 21,4     | 21,4          |
| 0,59           | 25,6                               | 25,5          | 22,5     | 22,4          |
| 0,62           | 27,7                               | 27,2          | 24,4     | 23,9          |
| 0,64           | 29,1                               | 28,4          | 25,6     | 25,0          |
| 0,67           | 31,2                               | 30,4          | 27,5     | 26,7          |
| 0,69           | 32,8                               | 31,7          | 28,9     | 27,9          |
| 0,72           | 35,1                               | 33,6          | 30,9     | 29,6          |
| 0,74           | 36,6                               | 34,9          | 32,2     | 30,7          |
| 0,77           | 39,0                               | 36,8          | 34,3     | 32,4          |
| 0,80           | 41,4                               | 38,9          | 36,4     | 34,2          |
| 0,83           | 43,9                               | 41,1          | 38,6     | 36,2          |
| 0,86           | 46,4                               | 43,1          | 40,8     | 37,9          |
| 0,90           | 50,0                               | 45,9          | 44,0     | 40,4          |
| 0,93           | 52,6                               | 48,0          | 46,2     | 42,2          |
| 0,96           | 55,3                               | 50,3          | 48,7     | 44,3          |
| 1,00           | 59,1                               | 53,3          | 52,0     | 46,9          |
| 1,04           | 62,9                               | 56,2          | 55,3     | 49,5          |

Таблица 7.2.5

Диаметр медной проволоки для плавких вставок

| Диаметр, мм        | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
|--------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Число проволок     | 1   | 1    | 1   | 1   | 2   | 2   | 3   | 5   | 7   |
| Номинальный ток, А | 4   | 6    | 10  | 15  | 20  | 25  | 35  | 50  | 60  |

### 7.3. Контактторы

Контактторы применяются для коммутации силовых цепей в устройствах управления электроприводами. По своему назначению они подразделяются на контактторы постоянного и переменного тока (табл. 7.3.1–7.3.3).

Таблица 7.3.1

## Технические данные контакторов

| Тип                                       | Номинальные |                       | Обмотка                  |       | Допустимая частота включений, 1/ч |
|---|-------------|-----------------------|--------------------------|-------|-----------------------------------|
|   | U, В        | I, А                  | U, В                     | P, Вт |                                   |
| Контакторы постоянного тока               |             |                       |                          |       |                                   |
| КП 1                                      | 220         | 20, 40, 75            | 110                      | 20    | 1200                              |
| КП 7                                      | 600         | 2500                  | 110, 220                 | 180   | 240                               |
| КП 207                                    | 600         | 2500                  | 110, 220                 | 180   | 240                               |
| КПВ 600                                   | 220         | 63, 100, 160          | 110, 220                 | 30–70 | 300–1200                          |
|   |             | 250, 630              |                          |       |                                   |
| КПД 100                                   | 220         | 25, 63, 100, 160, 250 | 110, 220, 400            | 16–35 | /                                 |
| Контакторы постоянного и переменного тока |             |                       |                          |       |                                   |
| МК I                                      | =220, 500   | 40                    | 24, 48, 110, 220         | 38    |                                   |
| КМЗ-0                                     | =220, ~380  | 4,5                   | ~127, ~220               | –     | –                                 |
| КМ 200                                    | ~220, 380   | до 350–600            | = 110, 220~127, 220, 380 | 50    | 600                               |

Таблица 7.3.2

## Технические данные контакторов переменного тока

| Тип      | Номинальные |                               | Число полюсов | Допустимая частота включений, 1/ч |
|----------|-------------|-------------------------------|---------------|-----------------------------------|
|          | U, В        | I, А                          |               |                                   |
| КТ 6000  | 380, 660    | 100, 160, 250, 400, 650, 1000 | 2, 3, 4, 5    | 1200                              |
| КТ 7000  | 380, 660    | 100, 160                      | 2, 3, 4, 5    | 600                               |
| КТД 121  | ≤500        | 40                            | 3             | 1200                              |
| КТПВ 600 | ≤380        | 63, 100, 250, 160             | 2             | 1200                              |

Таблица 7.3.3

## Технические данные двухполюсных высокочастотных контакторов

| Серия  | Тип    | I, А | U <sub>н</sub>                              | Примечание   |
|--------|--------|------|---|--|
| К 1000 | К 1121 | 800  | ~1600<br>(500–2500<br>–800 Гц)<br>(8000 Гц) | Контакторы без охлаждения предназначены для работы при токе до 400 А и частоте 500–8000 Гц. При охлаждении водой I <sub>н</sub> контакторов может быть повышен до 800 А при частоте 8000 Гц, а до 1200 А – при частоте 2500 Гц |
|        | К 1211 | 1200 |   |  |
| К 1221 |        |      |   |  |
| К 1112 |        |      |   |  |
| К 1122 |        |      |   |  |
| К 1132 |        |      |   |  |
| К 1212 |        |      |   |  |
| К 1222 |        |      |   |  |
| К 1232 |        |      |   |  |

## 7.4. Магнитные пускатели переменного тока

Предназначены для дистанционного управления АД с короткозамкнутым ротором, осуществляют:

- 1) нулевую защиту (при исчезновении или снижении напряжения на 40 % от номинального, силовые контакты пускателя размыкаются);
- 2) защиту электродвигателей от перегрузки (в комплекте с тепловым реле).

Основные параметры пускателей серий ПМЕ и ПАЕ представлены в табл. 7.4.1–7.4.2.

Тип пускателя расшифровывается следующим образом: буквы обозначают серию, первая цифра (от 0 до 6) – величину пускателя (магнитные пускатели серии ПМЕ выпускаются 0, 1, 2 величины, а пускатели серии ПАЕ – 3, 4, 5, 6 величин), вторая цифра – исполнение по роду защиты от воздействия окружающей среды (1 – открытое, 2 – защищенное, 3 – пыле- и влагонепроницаемое), третья цифра – электрическое исполнение (1 – не-реверсивный без тепловых реле, 2 – то же с тепловыми реле, 3 – реверсивный без тепловых реле, 4 – то же с тепловыми реле).

Таблица 7.4.1

Технические данные магнитных пускателей серий ПМЕ и ПАЕ

| Серия   | $U_n = 380 \text{ В}$ |                                | Тип теплового реле | Номинальные токи тепловых реле в пускателе, А                   |
|---------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|---|
|         | $I_n, \text{ А}$      | $P_{\text{макс}}, \text{ кВт}$ |                    |   |
| ПМЕ-000 | 3                     | 1,1                            | ТРН-10А            | 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2;       |
| ПМЕ-100 | 10                    | 4                              | ТРН-10             | 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; 10 |
| ПМЕ-200 |                       |                                | 25                 | 10  |
| ПАЕ-300 | 40                    | 17                             | ТРН-40             | 12,5; 16; 20; 25; 32; 40  |
| ПАЕ-400 | 60                    | 30                             | ТРП-60             | 20; 25; 32; 40; 50; 60  |
| ПАЕ-500 | 115                   | 55                             | ТРП-150            | 50; 60; 80; 100; 120  |
| ПАЕ-600 | 150                   | 75                             | ТРП-150            | 100; 120; 150   |

Таблица 7.4.2

Обмоточные данные катушек магнитных пускателей

| Серия   | Диаметр мм при $U, \text{ В}$ , провод. |      | Число витков при $U, \text{ В}$ |      | Ток катушки, А при $U, \text{ В}$ |       |
|---------|---|------|---------------------------------|------|-----------------------------------|-------|
|         | 220                                     | 380  | 220                             | 380  | 220                               | 380   |
|         |   |      |                                 |      |                                   |       |
| ПМЕ-000 | 0,12                                    | 0,09 | 5300                            | 9000 | 0,055                             | 0,032 |
| ПМЕ-100 | 0,15                                    | 0,11 | 4150                            | 7170 | 0,104                             | 0,060 |
| ПМЕ-200 | 0,27                                    | 0,20 | 2600                            | 4500 | 0,136                             | 0,071 |
| ПАЕ-300 | 0,25                                    | 0,19 | 2280                            | 3800 | 0,146                             | 0,087 |
| ПАЕ-400 | 0,35                                    | 0,27 | 1600                            | 2760 | 0,280                             | 0,160 |
| ПАЕ-500 | 0,48                                    | 0,35 | 1200                            | 2070 | 0,355                             | 0,215 |
| ПАЕ-600 | 0,62                                    | 0,47 | 890                             | 1540 | 0,515                             | 0,290 |

При длительном режиме работы или редких включениях двигателя номинальный ток нагревательного элемента реле  $I_{НЭ}$  выбирают, исходя из номинального тока двигателя:  $I_{НЭ} \equiv I_{Н.ДВ}$ .

При пользовании этим соотношением необходимо учитывать тип и установки реле (в защищенном кожухе пускателя или открытой панели), окружающую температуру помещений, где находятся реле и двигатель, и вносить соответствующие поправки. Если же реле находится на панели или в открытом магнитном пускателе, то номинальный ток нагревательного элемента принимается на 15 % меньше номинального тока двигателя, т.е.:

$$I_{НЭ} = I_{Н.ДВ}/1,15.$$

Новые серии магнитных пускателей ПМЛ и ПМА по сравнению с сериями ПМЕ и ПАЕ обладают повышенной износостойкостью при меньших массогабаритных показателях (табл. 7.4.3).

Таблица 7.4.3

Массогабаритные показатели пускателей серии ПМЕ, ПАЕ, ПМЛ, ПМА

| $I_H$ , А при $U = 380$ В | Старая серия | Масса, кг | Новая серия | Масса, кг |
|---------------------------|--------------|-----------|-------------|-----------|
| До 10                     | ПМЕ-000      | 0,55      | ПМЛ-1000    | 0,37      |
|                           | ПМЕ-000М     | 0,55      |             |           |
|                           | ПМЕ-100      | 0,62      |             |           |
| 25                        | ПМЕ-200      | 1,3       | ПМЛ-2000    | 0,58      |
| 40                        | ПАЕ-300      | 2,2       | ПМА-3000    | 1,15      |
|                           |              |           | ПМЛ-3000    | 1,27      |
| 63                        | ПАЕ-400      | 4,5       | ПМА-4000    | 2,4       |
|                           |              |           | ПМЛ-4000    | 1,33      |
| 80                        |              | –         | ПМЛ-5000    | 3,5       |
| 100                       | ПАЕ-500      | 6,4       | ПМА-5000    | 3,0       |
| 125                       | –            | –         | ПМЛ-6000    | 4,6       |
| 160                       | ПАЕ-600      | 8,9       | ПМА-6000    | 4,8       |
| 200                       | –            | –         | ПМЛ-7000    | 6,6       |

**Пример 7.4.1.** Определить сечение изолированных проводов АПР-500 в тонкостенной стальной трубе и выбрать плавкие вставки предохранителей для защиты их при подведении электроэнергии к короткозамкнутому электродвигателю А-52-6 мощностью 4,5 кВт. Напряжение сети – 380 В,  $K_I = \frac{I_{II}}{I_H} = 5$ ,  $\eta = 0,845$ ,  $\cos \varphi = 0,80$ . Температура среды в цехе 25 °С.

#### Решение

1. Ток двигателя:

$$I = \frac{P_H \cdot 1000}{1,73 U \cos \varphi \eta} = \frac{4,5 \cdot 1000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,8 \cdot 0,845} = 10,1 \text{ А.}$$

2. Ток плавкой вставки:

$$I_{II} = K_I I = 5 \cdot 10,1 = 50,5 \text{ А,}$$

$$I_B \geq \frac{I_n}{2,5} = \frac{50,5}{2,5} = 20,2 \text{ А.}$$

Ближайшая стандартная плавкая вставка рассчитана на 25 А. Такую вставку и следует взять. Плавкая вставка на меньший номинальный ток, например на 20 А, при пуске двигателя может перегореть.

3. Сечение каждого провода по условиям нагрева и механической прочности принимаем равным 2,5 мм ( $I_{нп} = 19 \text{ А}$ ).

Отношение тока плавкой вставки к допустимому току провода составляет:

$$\frac{I_B}{I_{нп}} = \frac{25}{19} = 1,32.$$

Следовательно, выбранное сечение провода соответствует плавкой вставке.

**Пример 7.4.2.** Для двигателя примера 7.4.1 выбрать магнитный пускатель и нагревательный элемент теплового реле.

#### **Решение**

По табл. 7.4.1. для двигателя мощностью 4,5 кВт выбираем пускатель ПМЕ-212,  $I_n = 25 \text{ А}$ .

Номинальный ток нагревательного элемента:

$$I_{н.э} \cong I_{доп}, \quad I_{ндв} = 10,1 \text{ А.}$$

По табл. 7.4.1 выбираем нагревательный элемент ТРН-25 на номинальный ток 10 А.

### **7.5. Тиристорные пускатели**

По сравнению с магнитными аналогами тиристорные пускатели обладают следующими преимуществами:

- отсутствием механических коммутирующих контактов, что исключает образование дуги при коммутации; наличием большой коммутационной способности и большим сроком службы;
- высоким быстродействием системы;
- плавным пуском электродвигателя;
- устойчивостью к механическим воздействиям.

Тиристорные пускатели устойчиво работают при температуре окружающего воздуха от  $-40$  до  $+40$  °С, относительной влажности не более  $90 \pm 3 \%$ . Окружающая среда не должна содержать токопроводящей пыли, а также агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металл и изоляцию. На промышленных предприятиях применяются тиристорные пускатели ПТ 40-380, ПТ 40-380Д (реверсивные) и пусковые тиристорные устройства ПТУ 63-380. Принципиальная схема тиристорного пускателя ПТ 40-380 приведена на рис. 7.5.1.

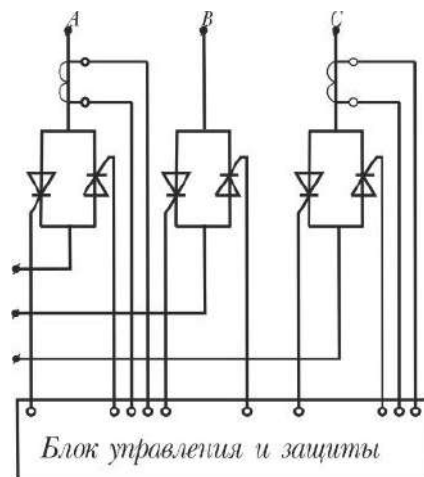


Рис. 7.5.1. Принципиальная схема  
тиристорного пускателя ПТ 40-380

Техническая характеристика тиристорных пускателей ПТ 40-380, ПТ 40-380 Д открытого исполнения

|   |     |
|---|-----|
| Напряжение сети, В  | 380 |
| Частота, Гц   | 50  |
| Номинальный ток, А  | 46  |
| Ток утечки при закрытых тиристорах, мА,<br>не более,                    | 20  |
| Пусковой ток, коммутируемый пускателями<br>в течение 0,4 с, А, не более | 200 |
| Напряжение в цепях управления, В  | 24  |
| Ток в цепях управления, А, не более                                     | 0,3 |
| Срок службы, тыс. ч   | 10  |
| Масса, кг:  |     |
| ПТ 40-380   | 16  |
| ПТ 40-380 Д   | 24  |

Техническая характеристика тиристорного пускового устройства ПТУ 63-380

|  |                 |
|--|-----------------|
| Напряжение сети, В                       | 380             |
| Частота, Гц                              | 50              |
| Номинальный ток, А                       | 63              |
| Ток утечки при закрытых тиристорах, мА   | 24              |
| Ток в цепях управления, А                | 0,3             |
| Допустимые перегрузки при $1,2 I_n$      | в течение 5 мин |
| Предельная коммутационная способность, А | 1700            |
| Масса, кг                                | 50              |

## 7.6. Автоматические выключатели

Автоматы устанавливают для защиты от коротких замыканий на отвлечении к одному или группе токоприемников. Ток срабатывания максимального расцепителя  $I_{уэ}$  должен быть отстроен от максимального пускового тока токоприемника:

$$I_{уэ} \geq K_n I_{п},$$

где  $K_n$  – коэффициент надежности (запаса),  $K_n = 1,3 \div 1,8$ .

Номинальный ток теплового или комбинированного расцепителя:

$$I_{нр} \geq \alpha I_{нт},$$

где  $\alpha = 1$  для длительного режима и нормальных условий пуска;

$\alpha = 1,5$  – для продолжительного режима при тяжелых условиях пуска.

Условное обозначение выключателя серии А 3100:

- А 31 – серия выключателя;
- третья цифра – номинальный ток (1 и 2 – 100 А, 3 – 200 А, 4 – 600 А, 6 – 50 А);
- четвертая цифра – число полюсов;
- пятая цифра – исполнение.

Автоматические выключатели серии А 3700 «Электрон» и АБМ изготавливают в стационарном и выдвигном исполнении.

Технические данные автоматических выключателей приведены в табл. 7.6.1.

Таблица 7.6.1

Технические данные автоматических выключателей

| Серия выключателя | Тип выключателя | Номинальный ток; А | Число полюсов | Масса, кг |
|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|-----------|
| А 3100            | А 3113          | 100                | 2             | 2,3       |
|                   | А 3114          |                    | 3             | 2,6       |
|                   | А 3123          | 100                | 2             | 3,96      |
|                   | А 3124          |                    | 3             | 4,0       |
|                   | А 3133          | 200                | 2             | 8,2       |
|                   | А 3134          |                    | 3             | 9,1       |
|                   | А 3143          | 600                | 2             | 17,4      |
|                   | А 3144          |                    | 3             | 19,4      |
|                   | А 3161          | 50                 | 1             | 0,48      |
| А 3700            | А 3163          |                    | 3             | 1,2       |
|                   | А 3710          | 160                | 3             | 4,8       |
|                   | А 3720          | 250                | 3             | 6,7       |
|                   | А 3730          | 400                | 3             | 17,4      |
|                   | А 3740          | 630                | 3             | 23,9      |
| АК                | АК-63           | 63<br>(0,63–63)    | 2,3           |           |

| Серия выключателя | Тип выключателя | Номинальный ток; А | Число полюсов | Масса, кг |
|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|-----------|
| АП                | АК-50           | 50<br>(2–50)       | 2,3           |           |
|                   | АП-50           | 50<br>(1,6–50)     | 2,3           |           |
| АЕ 1000           | АЕ 1111         | 25                 | 1             | 0,16      |
| АЕ 2000           | АЕ 2010         | 10                 | 3             | 0,2       |
|                   | АЕ 2030         | 25                 | 3             | 0,9       |
| «Электрон»        | АЕ 2040         | 63                 | 3             | 1,4       |
|                   | АЕ 2050         | 100                | 3             | 2,2       |
|                   | Э 06            | 630                | 3             | 60        |
|                   | Э 10            | 1000               | 3             | 130       |
|                   | Э 16            | 1600               | 3             | 150       |
|                   | Э 25            | 2500               | 3             | 160       |
|                   | Э 40            | 4000               | 3             | 260       |
|                   | АВМ             | АВМ 4              | 400           | 3         |
| АВМ 10            |                 | 1000               | 3             |           |
| АВМ 15            |                 | 1500               | 3             |           |
| АВМ 20            |                 | 2000               | 3             |           |

*Примечание:* в скобках приведены значения тока уставки расцепителя.

## 7.7. Проверка исправности основных элементов электрических схем

### 1. Маркировка и проверка исправности резисторов

Резисторы являются широко распространенными элементами современных электрических схем и делятся на два вида: проволочные и непроволочные. Обозначения приведены в табл. 7.7.1.

Таблица 7.7.1

Параметры резисторов

| Единица измерения | Предел номинального сопротивления | Обозначение единиц измерения | Сокращен. обозначение | Полное обозначение        |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Ом                | До 91                             | Е                            | Е 47<br>4 Е7<br>47 Е  | 0,47 Ом 4,7 Ом<br>47 Ом   |
| Килоом            | 0,1–91                            | К                            | К 47<br>4 К7<br>47 К  | 470 Ом 4,7 кОм<br>47 кОм  |
| Мегом             | 0,1–91                            | М                            | М 47<br>4 М7<br>47 М  | 470 кОм 4,7 мОм<br>47 мОм |

Допустимые отклонения от номинальных сопротивлений постоянных резисторов маркируются:

- а) числом процентов;
- б) римскими цифрами I, II;
- в) буквами Ю, Я, А и другими (табл. 7.7.2). Если в маркировке отсутствует кодированное обозначение допуска, отклонение может достигать  $\pm 20\%$ .

Таблица 7.7.2

Маркировка резисторов

|             |           |           |            |             |             |         |              |
|-------------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|---------|--------------|
| Допуск %    | $\pm 0,1$ | $\pm 0,2$ | $\pm 0,5$  | $\pm 1$     | $\pm 2$     | $\pm 5$ | $\pm 10$     |
| Обозначения | Ж         | У         | Д          | Р           | Л           | И       | С            |
| Допуск %    | - 20      | - 30      | +50 ÷ - 10 | + 50 ÷ - 20 | + 80 ÷ - 20 | + 100   | + 100 ÷ - 10 |
| Обозначения | В         | Ф         | Э          | Б           | А           | Я       | Ю            |

Измерения номинальных значений сопротивлений, а также проверку на обрыв и пробой производят тестером, отдельным омметром или мостовой схемой. Наша промышленность выпускает резисторы типов МЛТ, ВС, УЛМ, УЛИ, БЛП, МГЦ, ПЭ, ПЭВР и др.

Мощность резисторов МЛТ (от 0,125 до 2 Вт) определяется их размерами. Мощность в ваттах резисторов ВС, ПЭ, ПЭВР указана цифрами. У проволочных резисторов переменного сопротивления имеются ещё буквы А, Б или В, которым соответствует линейный (А), логарифмический (Б) и обратно логарифмический (В) характер изменения сопротивления в зависимости от угла поворота оси (типов СП, СПЗ-7, СПЗ-8, СПЗ-12 и др.) Ряды номинальных значений сопротивлений переменных резисторов следующие: в Омах и кОм – 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; 10; 15; 22; 33; 47; 68; 100; 150; 220; 330; 470; 680; в мегомах – 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; 10.

Отклонения от номинальных значений сопротивлений на переменных резисторах не маркируются.

Проверка исправности переменных резисторов:

- а) внешним осмотром;
- б) проверка надежности контактирования;
- в) измерение величины сопротивления.

Проверка специальных резисторов производится при наличии их технических данных. Величина сопротивления данных резисторов изменяется под воздействием внешних факторов: температуры (термисторы), напряжения (варисторы) и света (фоторезисторы).

2. Маркировка и проверка исправности конденсаторов.

Обозначения конденсаторов производятся по таблице 7.7.3.

Допустимые отклонения емкостей те же, что и для сопротивлений (табл. 7.7.2) Различают три дефекта у неэлектролитических конденсаторов постоянной емкости (слюдяного, бумажного и других):

- 1) пробой;

- 2) утечка;
- 3) обрыв.

Таблица 7.7.3

Обозначения конденсаторов

| Единица измерения | Предел номинальной емкости | Обозначение единиц измерения | Сокращенное обозначение | Полное обозначение         |
|-------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Пикофарада        | 100                        | П                            | П25<br>2П5<br>25П       | 0,25 пф<br>2,5 пФ<br>25 пФ |
| Нанофарада        | 0,1 ÷ 100                  | Н                            | Н25                     | 250 пФ                     |
|                   |                            |                              | 2Н5                     | 2500 пФ                    |
|                   |                            |                              | 25Н                     | 0,025 мкФ                  |
| Микрофарада       | 0,1                        | М                            | М25                     | 0,25 мкФ                   |
|                   |                            |                              | 2М5                     | 2,5 мкФ                    |
|                   |                            |                              | 25М                     | 25 мкФ                     |
|                   |                            |                              | 250М                    | 250 мкФ                    |

Для проверки на пробой омметр переключают для измерения больших сопротивлений. Конденсатор исправен, если:

1. При емкости  $C = 10 \div 1000$  пФ стрелка прибора в момент присоединения конденсатора не отклоняется.

2. При емкости  $C = 0,01 \div 100$  мкФ стрелка прибора сначала отклоняется на некоторый угол, а затем сразу же возвращается в исходное положение.

3. Исправность электролитического конденсатора проверяют путем внешнего осмотра (отсутствие загрязнения поверхности, надломов, трещин и наличие надежного контакта в выводах) и измерения сопротивления утечки.

3. Проверка исправности диодов

Различают четыре дефекта у полупроводникового диода:

- 1) пробой;
- 2) обрыв;
- 3) утечка;
- 4) нарушение герметичности корпуса.

При пробое диода сопротивление в прямом и обратном направлениях близко к нулю (полупроводник становится проводником). При исправном диоде сопротивление в прямом направлении составляет от единиц Ом до единиц кОм, а в обратном – примерно от 50 кОм до единиц МОм. Простая схема прибора оценки работоспособности диодов приведена на рис. 7.7.1.

Диод Д имеет обрыв – лампы Л1 и Л2 не горят.

Диод Д пробит – обе лампы горят.

При исправном диоде Д и установке его, как показано на схеме, горит лампа Л1.

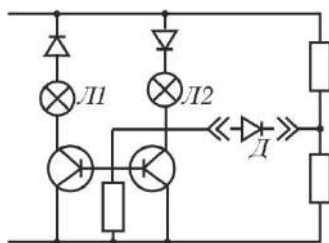


Рис. 7.7.1. Схема прибора оценки работоспособности диодов

Допустима проверка диода без выпаивания из схемы. Тогда влияют параллельные цепи, но  $R_{пр} \ll R_{обр}$  при исправном диоде. При обрыве  $R_{пр} = R_{обр} \approx \infty$ . При утечке диод в прямом направлении покажет нормальное сопротивление. Вначале (в течение первых секунд) и обратное сопротивление будет нормальным, а затем постепенно уменьшается. Утечка может быть заводским браком или результатом естественного старения. Нарушение герметичности – это механическое повреждение, оно внешне заметно.

#### 4. Проверка исправности транзисторов

Полупроводниковый триод впервые появился в 1948 году. Большое применение нашли транзисторы типов р-п-р и п-р-п. Энергетически различаются знаками напряжений, приложенных к электродам, графически – направлением стрелки эмиттера (рис. 7.7.2).

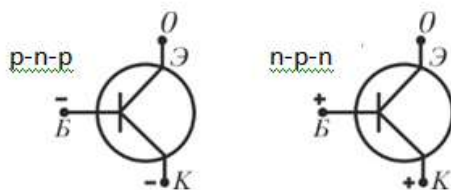


Рис. 7.7.2. Маркировка транзисторов

Когда напряжение на базе отсутствует, транзистор закрыт и в цепи коллектор-эмиттер тока нет. Транзистор типа р-п-р открывается при подаче на его базу отрицательного относительно эмиттера напряжения, а транзистор типа п-р-п, наоборот, открывается от положительного напряжения. От напряжения обратного знака, приложенного к базе, транзистор электрически еще больше запирается. Различают несколько дефектов транзистора:

- 1) пробой;
- 2) обрыв выводов;
- 3) короткое замыкание выводов;
- 4) частичный отказ (возрастание обратного тока, уменьшение коэффициента усиления и др.);
- 5) «плавание».

Общая оценка работоспособности транзисторов может быть приведена с помощью многопредельного омметра с напряжением питания не более 1,5 В (рис. 7.7.3 а).

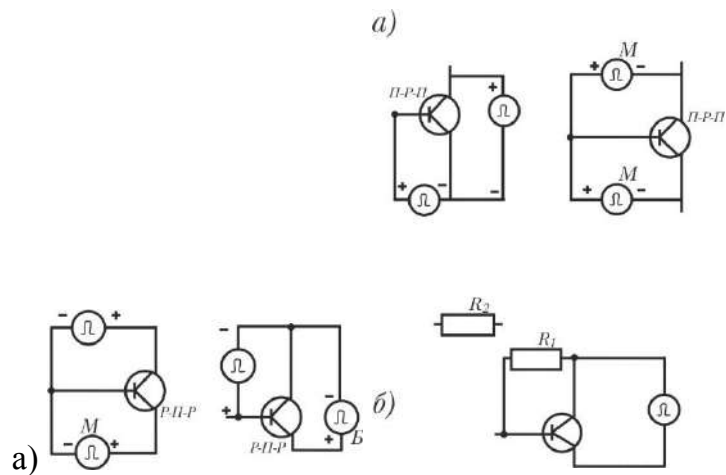


Рис. 7.7.3. Схемы оценки работоспособности транзисторов

Начинать измерение необходимо с предела с высоким сопротивлением с помощью рис. 7.7.3. Также можно выявить выводы и структуру транзистора. Прямое сопротивление эмиттерного и коллекторного переходов у транзисторов малой мощности 50–100 Ом, средней и большей – 10–30 Ом (на рисунке обозначение М). Большое значение сопротивления прямого перехода свидетельствует об обрыве. Обратное сопротивление перехода у транзисторов малой мощности должно быть не менее десятков кОм, а у транзисторов средней и большой мощности – более 1кОм (обозначение Б). Малое значение этого сопротивления – признак пробоя перехода. Приблизленную оценку статического коэффициента передачи тока можно производить по схеме (рис. 7.7.3 б):

$$V_{ст} \approx \frac{R_1 - R_2}{R_{кэ1} - R_{кэ2}},$$

где  $R_{кэ1}$ ,  $R_{кэ2}$  – значения сопротивления перехода К-Э при сопротивлениях в цепи Б-К, соответственно  $R_1$  и  $R_2$ .

### 5. Проверка исправности тиристоров

Общая оценка работоспособности тиристоров может производиться с помощью простого устройства со световой индикацией (рис. 7.7.4).

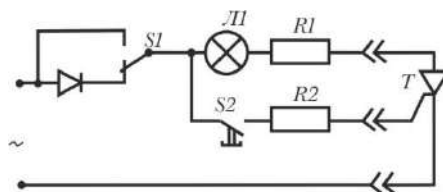


Рис. 7.7.4. Схема проверки работоспособности тиристоров

При нажатой кнопке S 2 и любом положении переключателя S1 лампа Л1 не должна светиться. Свечение лампы сигнализирует о пробое переходов. Из-за большого разброса напряжения включения разных типов тиристоров параметры приведенной схемы необходимо выбирать для каждого конкретного случая испытания.

Тиристор исправен, если:

– при отсутствии сигнала на управляющем электроде  $R_{пр} = R_{обр} \approx \infty$  (закрит);

– при кратковременном пропускании через управляющий электрод-катод положительного тока управления тиристор открывается.

Следует иметь в виду, что отпирающий ток управляющего электрода триодных тиристоров малой и средней мощности находится в пределах  $I_{упр} \approx 0,05 \div 200$  мА, напряжение  $U_{упр} \approx 0,25 \div 10$  В, у силовых вентилей-тиристоров  $I_{упр} \approx 0,3 \div 0,4$  А,  $U_{упр} \approx 5 \div 8$  В.

#### 6. Проверка интегральных микросхем (ИМС)

При проверке ИМС невозможно измерить режимы работы отдельных их элементов, поэтому при испытании достаточно проверять работоспособность ИМС в целом. Обычно на входе ИМС создают рабочие режимы и измеряют параметры микросхемы, подключенной, как правило, на эквивалентную нагрузку. Для проверки основных параметров ИМС существует три метода испытаний: статический, динамический, стендовый. Наиболее полным комплектом устройств, предназначенных для наладки систем автоматики, выполненных на цифровых ИМС, является КН-ДИ, разработанный ЛенПЭО ВНИИ проект электромонтаж и предназначенный для работы с ИМС серий К133, К155. В комплект входят следующие устройства: логический пробник П-1, датчик импульсов Д-1, генератор нормированного числа импульсов ГНЧИ, частотомер Ч-1, логический компаратор К-1 и модуль питания И-1.

Логический пробник П-1 является индикатором состояния логического сигнала: высокого (логическая «1»), – низкого (логический «0») и неопределенного. Каждое состояние определяется пороговым напряжением. Уровню логический «0» соответствует отсутствие свечения индикатора, логическая «1» – свечение индикатора, неопределенному уровню сигнала – изменение света свечения индикатора. Особенностью пробника является то, что он имеет устройство для растяжения импульсов, позволяющее индицировать узкие (не менее 50 нс) импульсы.

Для определения неисправной работы ИМС необходимо на вход подать сигнал и наблюдать за реакцией. Решить эту задачу позволяет логический датчик импульсов Д-1, генерирующий разнополярные мощные до 0,4 А при длительности 0,3 мкс одиночные импульсы или их серию и подающий их в любую точку схемы. Для проверки счетчиков, сумматоров, дешифраторов и других элементов вычислительной техники необходимо подать на

вход определенное число импульсов и по таблице истинности ИМС проконтролировать уровни выходных сигналов. Генератор нормированного числа импульсов ГНЧИ позволяет получать серию импульсов тока, число которых заранее программируется в пределах от 1 до 9999. Частота прохождения импульсов плавно регулируется от 1 до 10000 Гц. В генераторе предусмотрен режим непрерывной генерации импульсов с частотами, указанными ранее, а также возможность питания от внешнего источника тактовой частоты.

С помощью частотомера Ч-1 можно производить измерения числа и длительности импульсов на уровне логической «1» или логического «0» и временных интервалов от  $10^{-5}$  до 100 с; а также частоты периодической последовательности импульсов от 1 до  $10^6$  Гц. Логический компаратор К-1 служит для сравнения реакций эталонной и испытуемой ИМС. Стимулируя эталонную ИМС тем же сигналами что и испытуемую, и сравнивая их реакции, можно судить об исправности работы ИМС. Любая разница в реакции эталонной и испытуемой ИМС указывается светодиодом.

Модуль питания И-1 служит для подключения указанных приборов к источнику питания настраиваемого устройства или к отдельному источнику питания напряжением + 5 В ( $\pm 10\%$ ) Напряжение источника питания автоматически коммутируется для подключения его к приборам в заданной полярности. Модуль питания имеет защиту от перегрузок и попадания повышенного напряжения на его выход.

### 7.8. Включение катушек контакторов переменного тока на постоянный ток

Для увеличения надежности работы контакторов переменного тока катушки их иногда включают на постоянный ток (рис. 7.8.1).

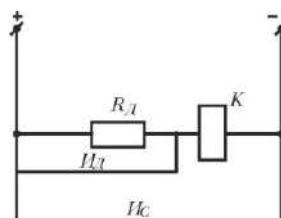


Рис. 7.8.1. Схема включения катушек контактора

При включении катушки в сеть переменного тока  $I_K = \frac{U}{\sqrt{R_K^2 + X_K^2}} = \frac{U}{Z}$ .

При включении в сеть постоянного тока:

$$I_K = \frac{U}{R_K},$$

поэтому необходимо подключить добавочное сопротивление:

$$R_d = \frac{U_d}{I_K} = \frac{U_c - I_K R_K}{I_K} = R_\Sigma - R_K,$$

где  $U_d$  – падение напряжения на добавочном сопротивлении;

$U_c$  – напряжение сети постоянного тока;

$R_k$  – активное сопротивление катушки;

$I_k$  – номинальный ток катушки.

**Пример 7.8.1.** Определить величину добавочного сопротивления в цепи катушки переменного тока Пб для включения его на постоянный ток напряжением 110 В. Технические данные контактора Пб:  $I_k = 0,1$  А,  $U_k = 127$  В,  $R_k = 185$  Ом.

### Решение

1. Падение напряжения на добавочном сопротивлении при включении катушки на постоянный ток:

$$U_d = U_c - I_k R_k = 110 - 0,1 \cdot 185 = 91,5 \text{ В.}$$

2. Добавочное сопротивление:

$$R_d = \frac{U_d}{I_k} = \frac{91,5}{0,1} = 915 \text{ Ом.}$$

## 7.9. Реле времени

Для работы схем автоматики часто необходимо создать выдержку времени между срабатыванием двух или нескольких аппаратов. Выдержку времени получают или с помощью контура резистор-конденсатор, или с помощью реле времени. На рис. 7.9.1 приведены схемы, позволяющие получить выдержку времени при включении и отключении реле.

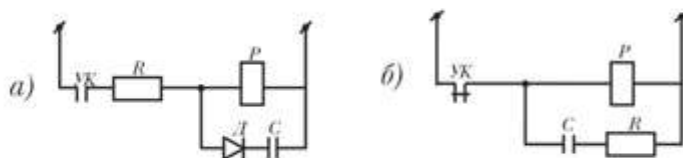


Рис. 7.9.1. Схемы выдержки времени:  
а – при включении, б – при выключении

После замыкания контакта УК осуществляется заряд конденсатора С и, при достижении на нем величины напряжения срабатывания реле Р, последнее включается. Выдержка времени определится:

$$T = RC,$$

где  $R$  – измеряется в Омах,  $C$  – в фарадах,  $T$  – в секундах.

Схема, приведенная на рис. 7.9.1 б, позволяет получить выдержку времени при отключении реле. После размыкания контактов УК реле Р не отключается мгновенно, так как через его катушку некоторое время протекает ток разряда конденсатора С. С помощью контура «резистор-конденсатор» может быть получена выдержка времени от 0,1 до нескольких секунд. Конструктивно реле времени делятся на:

- 1) реле с электромагнитным замедлителем;
- 2) реле с механическими и пневматическими замедлителями;
- 3) электронное реле времени.

Выдержки времени, получаемые при помощи реле с электромагнитным замедлителем, находятся в пределах от сотых долей секунды до нескольких секунд (например, РЭ-800). Пневматическое реле времени РВП-2000 позволяет регулировать выдержку времени в пределах 0,4–180 с. Разновидностью реле с механическим замедлителем являются моторные реле времени с выдержкой от нескольких секунд до нескольких часов (например, реле РВТ-1200, Е-52, Е-58, МРВ-6М и др.). Электронные реле времени применяют там, где необходимы малые габаритные размеры, высокая износостойчивость. Однако срок службы электронных реле времени до замены ламп составляет не более 500 ч. Более долговечными являются транзисторные реле времени (рис. 7.9.2).

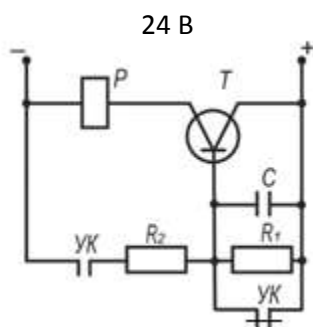


Рис. 7.9.2. Транзисторное реле времени

В исходном состоянии транзистор Т закрыт положительным потенциалом на базе. При подаче сигнала на включение (контакты УК) происходит заряд конденсатора С и транзистор откроется при появлении достаточного отрицательного потенциала. Выдержка времени реле Р определяется постоянной времени заряда конденсатора:

$$T = RC.$$

## 7.10. Схема защиты минимального напряжения

Для обеспечения автозапуска ответственных механизмов и групповой форсировки возбуждения СД значение напряжения срабатывания защиты

должно составлять  $0,6-0,8 U_n$ . При обрывах среднего провода напряжение на обмотках обоих реле снижается до  $0,5U_n$  (рис. 7.10.1).

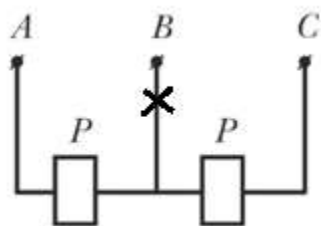


Рис. 7.10.1. Схема обеспечения автозапуска

Ниже приведена схема защиты минимального напряжения, реагирующая только на амплитудные изменения напряжения сети при трехфазном режиме питания и в случаях перегорания одного или двух предохранителей в измерительных цепях (рис. 7.10.2).

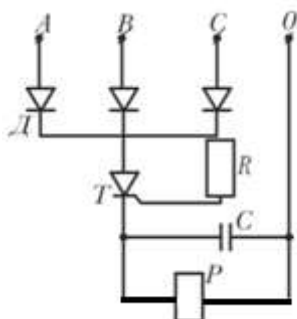


Рис. 7.10.2. Схема защиты от минимального напряжения

Тиристор Т открывается импульсом любой фазы, обеспечивает заряд конденсатора С до амплитудного значения фазного напряжения сети и запирается на время разряда конденсатора, как только напряжение на нем становится выше напряжения сети. На обмотке исполнительного реле Р возникает пилообразное напряжение, которое формируется одной из фаз напряжения питания и пропорционально напряжению сети. При исчезновении одной или двух фаз напряжения в измерительной цепи пилообразное напряжение обеспечивается неповрежденной фазой. Данная схема позволяет выполнить защиту минимального напряжения на одном реле типа ЭН-500 или РН-54 при расширении шкалы уставок срабатывания защиты и исключить неправильную работу защиты при неисправностях в измерительных цепях напряжения и повысить надежность работы.

## Глава 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ, ПРОВОДА И КАБЕЛИ

### 8.1. Передача электроэнергии

#### 1. Линии электропередач (ЛЭП)

В реальных линиях передач при передаваемой мощности в десятки мегаватт коэффициент полезного действия составляет  $\eta = 0,92-0,95$ , а напряжение  $U_2$  на несколько процентов меньше  $U_1$  (рис. 8.1.1) КПД будет тем выше, чем больше напряжение источника  $U_1$ :

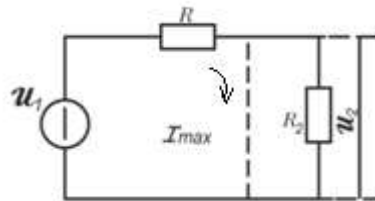


Рис. 8.1.1. Электрическая схема ЛЭП

$$R_2 = \frac{U_2^2}{P_2}$$

Снижение  $R_2$  при  $R = \text{const}$  приведет к уменьшению КПД:

$$\eta = \frac{R_2}{R+R_2}$$

Максимальное значение тока имеет место при коротком замыкании нагрузки:

$$I_{\max} = \frac{U_1}{R}$$

Зависимость напряжения  $U$  от передаваемой мощности  $P$  и дальности передачи  $l$  приведена в табл. 8.1.1.

Таблица 8.1.1

Зависимость напряжения  $U$  от передаваемой мощности  $P$

| U, кВ | Передаваемая мощность, P, МВт |        | Дальность передачи l, км |
|-------|-------------------------------|--------|--------------------------|
| 0,22  | 0,05                          | - 0,1  | До 0,3                   |
| 0,38  | 0,1                           | - 0,2  | 0,5                      |
| 6     | 2                             | - 3    | 5,0                      |
| 10    | 3                             | - 5    | 10                       |
| 20    | 5                             | - 8    | 15–25                    |
| 35    | 8                             | - 12   | 25–40                    |
| 110   | 12                            | - 50   | 50–150                   |
| 220   | 50                            | 150    | 200–300                  |
| 330   | 150                           | - 1000 | 300–500                  |
| 500   | 1000                          | и выше | Более 500                |

## 2. ЛЭП под землей

Голландский физик Каммерлинг-Оннес в 1911 г. на примере ртути открыл явление сверхпроводимости. В настоящее время созданы соленоиды-катушки из сверхпроводящих материалов в жидком гелии, наведенный ток в которых может «храниться» практически неограниченно долго. Созданы магниты, где сверхпроводники экономят огромное количество электроэнергии. Воздушные ЛЭП – неэкономичные сооружения (значительные потери электроэнергии, тысячи тонн металла). ЛЭП-1500 кВ – это предел, выше которого поднять напряжение практически невозможно.

Представим, что электрический ток  $I = 20000$  А в кабеле длиной 1000 км идет по тонкой пленке из сверхчистого ниобия. Сверхпроводник охлажден до  $-269$  °С в жидком гелии, который подается от криогенных станций, расположенных вдоль трассы пролегания кабеля. Потери минимальные. Такой линии не страшны ни ветры, ни ураганы, ни грозы. В недалеком будущем первая ЛЭП под землей войдет в строй действующих как одна из наиболее экономичных линий.

## 8.2. Расчет линий трехфазного тока

При расчете линий трехфазного тока, обладающих активным и индуктивным сопротивлениями, практическое значение имеет потеря напряжения, а не падение напряжения, т.е. арифметическая, а не геометрическая разность между напряжениями в начале и в конце линии. Основная (хотя и приближенная) формула для расчета потери:

$$\Delta U = \sqrt{3} I_p (R \cos \varphi + X \sin \varphi), \text{ В}$$

где  $I_p$  – расчетный ток линии, А;  $R, X$  – активное и индуктивное сопротивления линии, Ом;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности нагрузки на конце линии.

**Пример 8.2.1.** Линия 380 В, медные провода 3 x 16 мм<sup>2</sup>. Расстояние между проводами  $l = 0,4$  м, расположение проводов симметричное.  $I_p = 30,5$  А;  $\cos \varphi = 0,7$ ;  $R = 0,15$  Ом;  $X = 0,043$  Ом. Определить  $\Delta U$ .

**Решение**

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 30,5(0,15 \cdot 0,7 + 0,043 \cdot 0,71) = 7,11 \text{ В.}$$

## 8.3. Электропередачи постоянного тока

Электропередачи постоянного тока (ППТ) могут применяться для решения достаточно широкого круга задач электроэнергетики, таких как:

- а) транспорт энергии от удаленных электростанций;
- б) связь систем, работающих несинхронно или с различной частотой;

- в) пересечение больших водных пространств с помощью кабельных линий;
- г) глубокие кабельные вводы в города и промышленные центры;
- д) межгосударственные связи.

Структурная схема ППТ приведена на рис. 8.3.1.

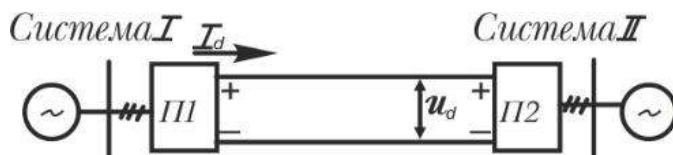


Рис. 8.3.1. Структурная схема ППТ

Постоянный ток здесь используется лишь для транспорта энергии. Выработка электроэнергии и её распределение производятся на переменном токе.

П1 и П2 – соответственно выпрямитель и инвертор. Преобразователь П1 преобразует энергию переменного тока в энергию постоянного тока и передает её в линию; инвертор (П2) преобразует энергию постоянного тока, получаемую из линии, в энергию переменного тока и отдает её приемной системе.

#### 8.4. Расчет проводов и кабелей

##### 1. Определение сечения проводов и кабелей по допустимому нагреву

Ток, при котором установившаяся температура провода соответствует нормам, называется допустимой длительной токовой нагрузкой (ДДТН) провода. Предельная температура нагрева; для изолированных проводов и кабелей составляет 60–80 °С в зависимости от типа изоляции и условий монтажа. Диаметр труб для прокладки проводов:

$$D \geq \sqrt{\frac{n_1 \cdot d_1^2 + n_2 \cdot d_2^2 + \dots}{0,32}},$$

где D – внутренний диаметр трубы, мм;

$n_1, n_2$  и т.д. – число проводов одинакового сечения;

$d_1, d_2$  и т.д. – наружные диаметры проводов, мм.

В табл. 8.4.1–8.4.3 приведен сортамент стальных и полипропиленовых труб, применяемых для электропроводок.

ДДТН на провода с резиновой или ПВХ изоляцией и шнуры с резиновой изоляцией с медными и алюминиевыми жилами приведены в табл. 8.4.4.

ДДТН на кабели с бумажной пропитанной маслоканифольной изоляцией, в свинцовой или алюминиевой оболочке, прокладываемые в земле, приведены в табл. 8.4.5.

Таблица 8.4.1

## Полипропиленовые трубы

| Условный проход, мм | Наружный диаметр, мм | Толщина стенки, мм | Масса 1 м, кг |
|---------------------|----------------------|--------------------|---------------|
| 15                  | 20                   | 2,5                | 0,14          |
| 25                  | 32                   | 2,5                | 0,22          |
| 50                  | 63                   | 3,0                | 0,3           |
|                     |                      | 5,0                | 0,54          |
| 100                 | 110                  | 5,3                | 0,87          |
|                     |                      | 8,3                | 1,64          |
|                     |                      |                    | 2,64          |

Таблица 8.4.2

## Водогазопроводные (газовые) стальные трубы

| Обыкновенные (ГОСТ 3262) |             |            |                    | Легкие ГОСТ 3252 |                    | Прямые короткие муфты |           | Контргайки, мм |             |
|--------------------------|-------------|------------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------|----------------|-------------|
| условный проход, мм      | диаметр, мм |            | толщина стенки, мм | масса 1 м, кг    | толщина стенки, мм | масса 1 м, кг         | длина, мм |                | толщина, мм |
|                          | наружный    | внутренний |                    |                  |                    |                       |           |                |             |
| 15                       | 21,3        | 15,7       | 2,8                | 1,28             | 2,5                | 1,16                  | 28        | 4              | 8           |
| 20                       | 26,8        | 21,2       | 2,8                | 1,66             | 2,5                | 1,50                  | 31        | 4              | 9           |
| 25                       | 33,5        | 27,1       | 3,2                | 2,39             | 2,8                | 2,12                  | 35        | 5              | 10          |
| 32                       | 42,3        | 35,9       | 3,2                | 3,09             | 2,8                | 2,73                  | 39        | 5              | 10          |
| 40                       | 48,0        | 41,0       | 3,5                | 3,84             | 3,0                | 3,33                  | 43        | 5-             | 10          |
| 50                       | 60,0        | 53,0       | 3,5                | 4,38             | 3,0                | 4,22                  | 47        | 5,5            | 10          |
| 70                       | 75,5        | 67,5       | 4,0                | 7,05             | 3,2                | 5,71                  | 53        | 6              | –           |
| 80                       | 88,5        | 80,5       | 4,0                | 8,34             | 3,5                | 7,34                  | 59        | 6              | –           |
| 100                      | 114,0       | II 5,0     | 4,5                | 12,15            | 4,0                | 10,85                 | –         | –              | –           |

Таблица 8.4.3

## Стальные тонкостенные электросварные трубы (ГОСТ 10704)

| Условный проход, мм                             | Наружный диаметр, мм | Толщина стенки, мм | Масса 1 м, кг | Условный проход, мм      | Наружный диаметр, мм | Толщина стенки, мм | Масса 1 м, кг |
|---|----------------------|--------------------|---------------|--------------------------|----------------------|--------------------|---------------|
| Для соединения на накатной резьбе или манжетами |                      |                    |               | Для соединения манжетами |                      |                    |               |
| 15  | 20                   | 1,6                | 0,73          | 15                       | 18                   | 1,6                | 0,65          |
|   |                      | 2,2                | 1,05          |                          |                      |                    |               |
| 20  | 26                   | 1,8                | 1,07          | 20                       | 25                   | 1,6; 1,8           | 0,93; 1,03    |
|   |                      | 2,3                | 1,43          |                          |                      |                    |               |
| 25  | 32                   | 2,0                | 1,48          | 25                       | 30                   | 1,8                | 1,25          |
|   |                      | 2,5                | 1,82          |                          | 33                   | 2,0                | 1,53          |
| 32  | 41                   | 2,5                | 2,37          | 32                       | –                    | –                  | –             |
|   | 42                   | 2,5                | 2,44          |                          |                      |                    |               |
| 40  | 47                   | 2,0                | 2,21          | 40                       | 45                   | 2,0                | 2,12          |
|   |                      | 2,8                | 3,08          |                          |                      |                    |               |
|   | 48                   | 2,8                | 3,11          |                          | 48                   | 2,0                | 2,27          |
| 50  | 59                   | 2,0                | 2,82          | 50                       | 57,0                 | 2,0                | 2,71          |
|   | 60                   | 2,8                | 3,80          |                          |                      |                    |               |
|   |                      | 2,8                | 3,94          |                          | 60                   | 2,0                | 2,86          |

Таблица 8.4.4

Параметры проводов с резиновой и ПХВ изоляцией

| S жилы, мм <sup>2</sup> | Провода,<br>проложенные открыто | Провода, проложенные в одной трубе |          |          |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------|----------|
|                         |                                 | 2x1 жил.                           | 3x1 жил. | 4x1 жил. |
| 0,5                     | 11/-                            |                                    | -        | -        |
| 0,75                    | 15/-                            |                                    |          | -        |
| 1,0                     | 17/-                            | 16/-                               | 15/-     | 14/-     |
| 1,5                     | 23/-                            | 19/-                               | 17/-     | 16/-     |
| 2,5                     | 30/24                           | 27/20                              | 25/19    | 25/19    |
| 4                       | 41/32                           | 38/28                              | 35/28    | 30/23    |
| 6                       | 50/39                           | 46/36                              | 42/32    | 40/30    |
| 10                      | 80/55                           | 70/50                              | 60/47    | 50/39    |
| 16                      | 100/80                          | 85/60                              | 80/60    | 75/55    |
| 25                      | 140/105                         | 115/85                             | 100/80   | 90/70    |
| 35                      | 170/130                         | 135/100                            | 125/95   | 115/85   |
| 50                      | 215/165                         | 185/140                            | 170/130  | 150/120  |
| 70                      | 270/210                         | 225/175                            | 210/165  | 185/140  |
| 95                      | 330/255                         | 275/215                            | 255/200  | 255/175  |
| 120                     | 385/295                         | 315/245                            | 290/220  | 260/200  |
| 150                     | 440/340                         | 360/275                            | 330/255  | -        |
| 185                     | 510/390                         | -                                  | -        | -        |
| 240                     | 605/465                         | -                                  | -        | -        |
| 300                     | 700/535                         | -                                  | -        | -        |
| 400                     | 830/645                         | -                                  | -        | -        |

*Примечания:* 1. Таблица составлена из расчета нагрева жил до 55°С при  $t^{\circ}_{\text{воздуха}} = 25^{\circ}\text{C}$  и  $t^{\circ}_{\text{земли}} = 15^{\circ}\text{C}$ .

2. В числителе приведены нагрузки для медных жил, в знаменателе для алюминиевых.

Таблица 8.4.5

Кабели с бумажной пропитанной маслоканифольной изоляцией

| Сечение<br>токопроводящей<br>жилы, мм <sup>2</sup> | Токовые нагрузки, А                           |                                    |                                      |                                    |   |
|--|---|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---|
|  | Одножиль-<br>ные кабели<br>до 1 кВ            | Двухжиль-<br>ные кабели<br>до 1 кВ | Трехжиль-<br>ные кабели<br>до 1–3 кВ | Трехжиль-<br>ные кабели<br>до 6 кВ | Четырех-<br>жильные ка-<br>бели до 1 кВ |
|  | Максимально допускаемая $t^{\circ}$ жил, град |                                    |                                      |                                    |   |
|  | 80  |                                    |                                      | 65                                 | 80                                      |
| 2,5  | ...   | 45                                 | 40/31                                | -                                  |   |
| 4  | 80  | 60                                 | 55/42                                |                                    | 50/38                                   |
| 6  | 105   | 80                                 | 70/56                                |                                    | 60/46                                   |
| 10   | 140   | 105                                | 95/75                                | 80/60                              | 85/65                                   |
| 16   | 175   | 140                                | 120/90                               | 105/80                             | 115/90                                  |
| 25   | 235   | 185                                | 160/125                              | 135/105                            | 150/115                                 |
| 35   | 285   | 225                                | 190/145                              | 160/125                            | 175/135                                 |
| 50   | 360   | 270                                | 235/180                              | 200/155                            | 215/165                                 |
| 70   | 440   | 325                                | 285/220                              | 245/190                            | 265/200                                 |
| 95   | 520   | 380                                | 340/260                              | 295/225                            | 310/240                                 |
| 120  | 595   | 435                                | 390/300;                             | 340/260                            | 350/270                                 |
| 150  | 675   | 500                                | 435/335                              | 390/300                            | 395/305                                 |
| 185  | 755   |                                    | 490/380                              | 440/340                            | 450/345                                 |
| 240  | 880   | -                                  | 570/440                              | 510/390                            | -                                       |

*Примечания:* 1. Данные таблицы приняты из расчета земли  $t_{\text{земли}}^{\circ} = 15^{\circ}\text{C}$ .

2. В числителе приведены нагрузки для медных жил, в знаменателе – для алюминиевых.

ДДТН на кабели с медными жилами с бумажной пропитанной изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке, прокладываемые в воздухе, приведены в табл. 8.4.6.

Таблица 8.4.6

Кабели с медными жилами

| Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup> | Токовые нагрузки, А                          |                            |                       |      |       |                               |
|--|--|----------------------------|-----------------------|------|-------|-------------------------------|
|  | Одножильные кабели до 1 кВ                   | Двухжильные кабели до 1 кВ | Трехжильные кабели до |      |       | Четырехжильные кабели до 1 кВ |
|  |  |                            | 3 кВ                  | 6 кВ | 10 кВ |                               |
|  | Максимально допустимая температура жил, град |                            |                       |      |       |                               |
| 80   |  |                            | 65                    | 60   | 80    |                               |
| 2,5  | 40   | 30                         | 28                    | –    | –     | –                             |
| 4  | 55   | 40                         | 37                    | –    | –     | 35                            |
| 6  | 75   | 55                         | 45                    | –    | –     | 45                            |
| 10   | 95   | 75                         | 60                    | 55   | –     | 60                            |
| 16   | 120  | 95                         | 80                    | 65   | 60    | 80                            |
| 25   | 160  | 130                        | 105                   | 90   | 85    | 100                           |
| 35   | 200  | 150                        | 125                   | 110  | 105   | 120                           |
| 50   | 245  | 185                        | 155                   | 145  | 135   | 145                           |
| 70   | 305  | 225                        | 200                   | 175  | 165   | 185                           |
| 95   | 360  | 275                        | 245                   | 215  | 200   | 215                           |
| 120  | 415  | 320                        | 285                   | 250  | 240   | 260                           |
| 150  | 470  | 375                        | 330                   | 290  | 270   | 300                           |
| 185  | 525  | –                          | 375                   | 325  | 305   | 340                           |
| 240  | 610  | –                          | 430                   | 375  | 350   | –                             |

*Примечание:* токовые нагрузки приняты для следующих расстояний в свету между кабелями: при прокладке их внутри и вне здания и туннелях – не менее 35 мм, в каналах – не менее 50 мм при любом числе проложенных кабелей и температуре воздуха + 25 °С.

Допустимые нагрузки на силовые кабели с медными и алюминиевыми жилами при частоте тока 1000, 2500 и 8000 Гц приведены в табл. 8.4.7.

ДДНТ для неизолированных проводов на открытом воздухе указаны в табл. 8.4.8.

ДДТН на шины приведены в табл. 8.4.9.

Таблица 8.4.7

Длительно допустимые нагрузки (А) на силовые кабели с медными и алюминиевыми жилами при частоте тока 1000, 2800 и 8000 Гц

| Площадь сечения жилы, мм <sup>2</sup> | Медная жила |         |         | Алюминиевая жила |         |         |
|---------------------------------------|-------------|---------|---------|------------------|---------|---------|
|                                       | 1000 Гц     | 2500 Гц | 8000 Гц | 1000 Гц          | 2500 Гц | 8000 Гц |
| <b>Двухжильные</b>                    |             |         |         |                  |         |         |
| 25                                    | 112         | 90      | 65      | 100              | 80      | 60      |
| 35                                    | 125         | 100     | 75      | 112              | 90      | 65      |
| 50                                    | 144         | 115     | 80      | 131              | 105     | 70      |
| 70                                    | 162         | 130     | 95      | 144              | 115     | 85      |
| 95                                    | 175         | 140     | 105     | 156              | 125     | 95      |
| 120                                   | 200         | 160     | 120     | 180              | 145     | 110     |
| 150                                   | 220         | 175     | 130     | 194              | 155     | 115     |
| <b>Четырехжильные</b>                 |             |         |         |                  |         |         |
| 50                                    | 232         | 185     | 140     | 212              | 170     | 125     |
| 70                                    | 262         | 210     | 160     | 238              | 190     | 140     |
| 95                                    | 278         | 230     | 170     | 256              | 205     | 150     |
| 120                                   | 315         | 260     | 190     | 288              | 230     | 170     |
| 150                                   | 350         | 280     | 210     | 312              | 250     | 185     |
| 185                                   | 375         | 300     | 220     | 338              | 270     | 200     |

*Примечание:* для двухжильных кабелей нагрузка указана на одну жилу, для четырехжильных – на две.

Таблица 8.4.8

ДДНТ для неизолированных проводов на открытом воздухе

| Медные |          | Алюминиевые |          | Стальные |          |
|--------|----------|-------------|----------|----------|----------|
| Марка  | Нагрузка | Марка       | Нагрузка | Марка    | Нагрузка |
| M4     | 50/30    | –           | –        | Ж-3,5    | 30       |
| M6     | 70/40    | –           | –        | Ж-4      | 35       |
| M10    | 95/70    | A-16        | 105      | Ж-5      | 40       |
| M16    | 130/100  | A-25        | 135      | Ж-6      | 60       |
| M25    | 180/140  | A-35        | 170      | ПС-35    | 80       |
| M35    | 220/175  | A-50        | 215      | ПС-50    | 90       |
| M50    | 270/220  | A-70        | 265      | ПС-70    | 125      |
| M60    | 315/250  | A-95        | 325      | ПС-85    | 140      |
| M70    | 340/280  | A-120       | 375      |          |          |
| M95    | 415/340  | A-150       | 440      |          |          |
| M120   | 485/405  | A-185       | 500      |          |          |
| M150   | 570/480  | A-240       | 585      |          |          |
| M185   | –/550    | –           | –        |          |          |

*Примечание:* в числителе – на воздухе, в знаменателе – внутри помещений.

Таблица 8.4.9

## Шины

| Ширина,<br>мм | Толщина,<br>мм | Медные |      |      |      | Алюминиевые |      |      |      |
|---------------|----------------|--------|------|------|------|-------------|------|------|------|
|               |                | 1      | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    |
| 15            | 3              | 210    | –    | –    | –    | 165         | –    | –    | –    |
| 20            |                | 275    | –    | –    | –    | 215         | –    | –    | –    |
| 25            |                | 340    | –    | –    | –    | 265         | –    | –    | –    |
| 30            | 4              | 475    | –    | –    | –    | 365         | –    | –    | –    |
| 40            |                | 625    | –    | –    | –    | 480         | –    | –    | –    |
| 40            | 5              | 700    | –    | –    | –    | 540         | –    | –    | –    |
| 50            |                | 860    | –    | –    | –    | 665         | –    | –    | –    |
| 50            |                | 955    | –    | –    | –    | 740         | –    | –    | –    |
| 60            | 6              | 1125   | 1740 | 2240 | –    | 870         | 1350 | 1720 | –    |
| 80            |                | 1480   | 2110 | 2720 | –    | 1150        | 1630 | 2100 | –    |
| 100           |                | 1810   | 2470 | 3170 | –    | 1425        | 1935 | 2500 | –    |
| 60            | 8              | 1320   | 2160 | 2790 | –    | 1025        | 1680 | 2180 | –    |
| 80            |                | 1690   | 2620 | 3370 | –    | 1320        | 2040 | 2620 | –    |
| 100           |                | 2080   | 3060 | 3930 | –    | 1625        | 2390 | 3050 | –    |
| 120           | 10             | 2400   | 3400 | 4340 | –    | 1900        | 2650 | 3380 | –    |
| 60            |                | 1475   | 2560 | 3300 | –    | 1155        | 2010 | 2650 | –    |
| 80            |                | 1900   | 3100 | 3990 | –    | 1480        | 2410 | 3100 | –    |
| 100           |                | 2310   | 3610 | 4650 | 5300 | 1820        | 2860 | 3650 | 4150 |
| 120           |                | 2650   | 4100 | 5200 | 5900 | 2070        | 3200 | 4100 | 4650 |

*Примечания:* 1. В таблице приведены токовые нагрузки при переменном токе.

2. При расположении шины прямоугольного сечения плашмя токовые нагрузки должны быть уменьшены на 5 % для шин шириной до 60 мм и на 8 % – для шин шириной > 60 мм.

Сечение алюминиевого провода для электродвигателей  $U = 380$  В при допустимой потере напряжения  $\Delta U \leq 5$  % определится по табл. 8.4.10.

Таблица 8.4.10

## Номенклатура сечения алюминиевых проводов

| S пров., | Мощность двигателя, кВт | Длина линии, м |
|----------|-------------------------|----------------|
| 2,5      | 1–7                     | 525–90         |
| 4        | 10                      | 113            |
| 6        | 13                      | 110            |
| 10       | 15–18                   | 190–150        |
| 16       | 20–30                   | 230–150        |
| 25       | 40                      | 180            |
| 35       | 50                      | 210            |
| 50       | 55–68                   | 275–200        |
| 70       | 70–88                   | 300–240        |
| 95       | 100–110                 | 300–240        |
| 120      | 115–125                 | 300–250        |

Номинальные диаметры проводов с медными и алюминиевыми круглыми жилами (по ГОСТ 1956) приведены в табл. 8.4.11.

Таблица 8.4.11

Номинальные диаметры и сечения проводов

| Сечение, мм <sup>2</sup> | Число проволок | Диаметр жилы, мм | Сечение, мм <sup>2</sup> | Число проволок | Диаметр жилы, мм |
|--------------------------|----------------|------------------|--------------------------|----------------|------------------|
| 0,1                      | 1              | 0,37             | 35                       | 7/1            | 7,53/6,60        |
| 0,2                      | 1              | 0,52             | 50                       | 7/1            | 9,05/9,00        |
| 0,35                     | 1              | 0,62             | 70                       | 19             | 10,65            |
| 0,5                      | 1              | 0,79             | 95                       | 19             | 12,55            |
| 0,75                     | 1              | 0,97             | 120                      | 37             | 14,07            |
| 1,0                      | 1              | 1,13             | 150                      | 37             | 15,68            |
| 1,5                      | 1              | 1,37             | 185                      | 37             | 17,57/15,3       |
| 2,5                      | 1              | 1,76             | 240                      | 61             | 20,16/17,4       |
| 4                        | 1              | 2,24             | 300                      | 61             | 22,59/19,5       |
| 6                        | 1              | 2,73             | 400                      | 61             | 25,65/ 22,5      |
| 10                       | 7/1            | 4,11/3,55        | 500                      | 91             | 28,73/25,2       |
| 16                       | 7/1            | 5,10/4,50        | 625                      | 127            | 32,63/28,2       |
| 25                       | 7/1            | 6,30/5,60        |                          |                |                  |

*Примечание:* цифры в числителе обозначают диаметр жилы при семи и более проволоках, в знаменателе – при одной проволоке.

2. Определение сечений проводников по экономической плотности тока  
Значения рекомендуемых плотностей тока приведены в табл. 8.4.12.

Таблица 8.4.12

Экономическая плотность тока

| Проводники  | Экономическая плотность тока, А/мм <sup>2</sup> при числе часов использования максимума нагрузки в год |           |        |
|---|--|-----------|--------|
|   | 1000–3000  | 3000–5000 | > 5000 |
| Неизолированные провода и шины:<br>медные                                 |  |           |        |
|   | 2,5  | 2,1       | 1,8    |
| алюминиевые   | 1,3  | 1,1       | 1,0    |
| Кабели с бумажной и провода<br>с резиновой изоляцией с жилами:<br>медными |  |           |        |
|   | 3,0  | 2,5       | 2,0    |
| алюминиевыми  | 1,6  | 1,4       | 1,2    |
| Кабели с резиновой и пластмассо-<br>вой изоляцией с жилами:<br>медными    |  |           |        |
|   | 3,5  | 3,1       | 2,7    |
| алюминиевыми  | 1,9  | 1,7       | 1,6    |

Проверке по экономической плотности тока не подлежат:

– сети промышленных предприятий и сооружений напряжением до 1 кВ при числе часов использования максимума нагрузки предприятий до 4000–5000 ч;

– ответвления к отдельным электроприемникам напряжением до 1 кВ, а также осветительные сети промпредприятий, жилых и общественных зданий;

– сборные шины электроустановок и ошиновка в пределах открытых и закрытых РУ всех напряжений;

– проводники, идущие к резисторам, пусковым реостатам и т.п.;

– сети временных сооружений.

При использовании табл. 8.4.12 необходимо руководствоваться следующим:

1) при максимуме нагрузки в ночное время экономическая плотность тока увеличивается на 40 %;

2) для изолированных проводников сечением 16 мм<sup>2</sup> и менее экономическая плотность тока увеличивается на 40 %.

3. Определение сечений проводов и кабелей по допустимой потере напряжения

Сечение проводов и кабелей по допустимой потере напряжения ( $\Delta U\%$ ) определяют в основном для осветительных сетей. Для силовых сетей этот метод применим лишь при сравнительно большой их протяженности (вне-цеховой сети).

Сечение проводов и кабелей с одинаковым сечением по всей длине рассчитывают по формулам:

1. Для трехфазной сети с сосредоточенной нагрузкой в конце линии:

$$S = \frac{Pl \cdot 10^5}{\gamma U^2 \Delta U\%}, \text{ мм}^2.$$

2. Для трехфазной сети с несколькими нагрузками и одинаковым сечением проводов.

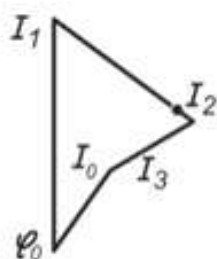


Рис. 8.4.1. Диаграмма к расчету тока в нулевом проводе

$$S = \frac{(P_1 l_1 + P_2 l_2 + \dots) \cdot 10^5}{\gamma U^2 \Delta U\%}, \text{ мм}^2$$

где  $P, P_1, P_2$  – расчетные нагрузки, кВт;

$l, l_1, l_2$  – длины отдельных участков линии, м;

$\gamma$  – удельная проводимость,  $\frac{\text{м}}{\text{Ом мм}^2}$  (для алюминия –  $34,5 \frac{\text{м}}{\text{Ом мм}^2}$ , для меди –  $57 \frac{\text{м}}{\text{Ом мм}^2}$ );

$\Delta U\%$  – допустимые потери напряжения, % (для силовых сетей  $\Delta U\% = 5\%$ , для осветительных –  $2,5\%$ );

$U$  – линейное напряжение, В.

#### 4. Определение сечений проводов по механической прочности

При расчете сечений проводов необходимо учитывать не только условия нагрева и допустимую потерю напряжения, но и их механическую прочность. По механической прочности рассчитывается обычно сечение проводов воздушных линий. Например, наименьшие сечения проводов, допускаемые по механической прочности для воздушных линий до 1000 В: медные провода –  $6 \text{ мм}^2$ , алюминиевые провода –  $16 \text{ мм}^2$ .

### 8.5. Определение параметров трехфазных цепей при различных режимах

#### 8.5.1. Четырехпроводная система

В четырехпроводной цепи трехфазной сети нулевой провод обеспечивает равенство напряжений на отдельных фазах приемников и на соответствующих фазах источника при различных нагрузках фаз. Обрыв нулевого провода при несимметричной нагрузке в четырехпроводной цепи приводит к смещению нейтрали и изменению фазных напряжений приемников, что недопустимо. Когда токи в трех фазах имеют различные углы сдвига по отношению к напряжению фаз, определение величины и фазы тока в нулевом проводе  $I_0$  производится графически (рис. 8.4.1).

При одинаковых углах сдвига, например, при бытовой нагрузке, когда  $I_1 > I_2 > I_3$ :

$$\text{ток } I_0 = \sqrt{\frac{(I_1 - I_2)^2 + (I_2 - I_3)^2 + (I_3 - I_1)^2}{2}},$$

$$\text{или } I_0 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 - I_1 \cdot I_2 - I_2 \cdot I_3 - I_3 \cdot I_1}.$$

Угол сдвига  $\varphi_0$  между током нулевого провода, текущим обратно в сеть, и наибольшим током  $I_1$ :

$$\sin \varphi_0 = \frac{\sqrt{3}(I_2 - I_3)}{2I_0} = 0,86 \frac{I_2 - I_3}{I_0}.$$

**Пример 8.5.1.1.** Четырехпроводная система (рис. 8.5.1.1).

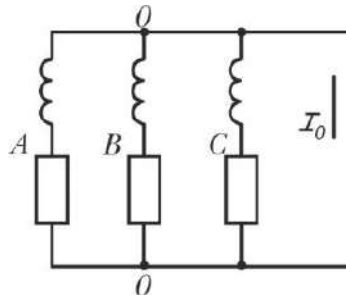


Рис. 8.5.1.1. Четырехпроводная система

а) токи  $I_A = I_B = I_C$  тогда  $U_A = U_B = U_C$ .

б) мощности  $P_C > P_A > P_B$  (обрыв провода 0). Тогда токи  $I_C > I_A > I_B$ ,  $U_B > U_A > U_C$ .

**Пример 8.5.1.2.** Дано:  $U_{AO} = 220$  В;  $I_A = 3$  А,  $Z_1 = Z_2 = Z_3$ .

Определить:

а)  $I_C$ ,  $I_B$ ,  $I_0$ ;

б) то же при обрыве провода А;

в) то же при обрыве проводов 0 и А.

**Решение**

а)  $I_B = I_C = 3$  А;  $I_0 = 0$ ;

б)  $I_A = 0$ ;  $I_B = I_C = 3$  А;  $I_0 = 3$  А;

в)  $I_B = I_C = 3 \cdot \frac{190}{220} = 2,6$  А.

### 8.5.2. Трехпроводная система

**Пример 8.5.2.1.** Пример трехпроводной сети с обрывом провода в одной фазе представлен на рис. 8.5.2.1.

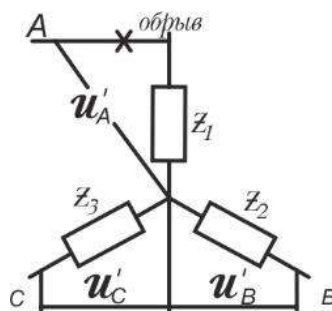


Рис. 8.5.2.1. Схема трехпроводной сети с обрывом провода в одной фазе

Дано:  $U_{AB} = 380$  В;  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 10$  м.

Обрыв провода А.

Определить:  $U_A^1$ ,  $U_B^1$ ,  $U_C^1$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ .

**Решение**

$$U'_A = U_A + U_0 = 220 + 110 = 330 \text{ В.}$$

$$U'_B = U'_C = \frac{U_{BC}}{2} = \frac{380}{2} = 190 \text{ В.}$$

$$I_B = I_C = \frac{380}{2Z} = 190 \text{ А, (до обрыва } I_A = I_B = I_C = 220 \text{ А).}$$

**Пример 8.5.2.2.** Вариант обрыва фазы при соединении нагрузки в треугольник представлен на рис. 8.5.2.2.

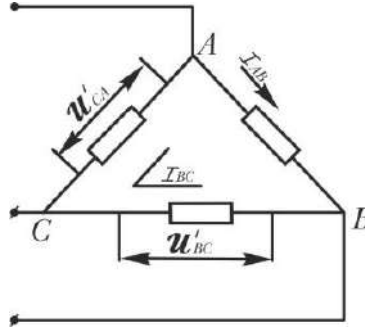


Рис. 8.5.2.2. Схема обрыва провода при соединении нагрузки в треугольник

Дано: Обрыв провода С. (До обрыва  $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$ ).  
 Определить:  $I_{AB}$ ,  $I_{BCA}$ ,  $U'_{CA}$ .

**Решение**

1.  $I_{AB}$  остается прежним (как и до обрыва).

2.  $I_{BCA} = \frac{U_{BCA}}{Z_{BCA}}$ , где  $I_{BCA}$  – общий ток в фазах BC, CA:

$$Z_{BCA} = Z_{BC} + Z_{CA}.$$

3.  $U'_{CA} = I_{BCA} \cdot Z_{CA}$ ;  $U'_{BC} = I_{BCA} \cdot Z_{BC}$ ; (если  $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$ , то  $U_{CA} = U_{BC} = \frac{U_{AB}}{2}$ ,  $I_{BCA} = \frac{I_{AB}}{2}$ ).

**Пример 8.5.2.3.** Схема при одинаковом сдвиге нагрузок фаз представлена на рис. 8.5.2.3.

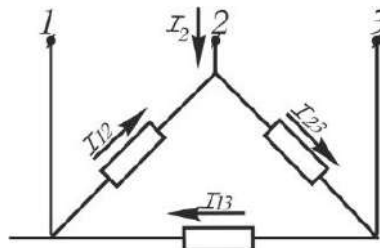


Рис. 8.5.2.3. Схема при одинаковом сдвиге нагрузок фаз

Дано: Сдвиг фаз нагрузок одинаковый.  
 Определить  $I_2$ .

**Решение**

$$I_2 = \sqrt{I_{12}^2 + I_{23}^2 + I_{12} \cdot I_{23}}$$

Если  $I_{12} = I_{23}$  (рис. 8.5.2.4), тогда  $I_2 = \sqrt{3}I_{12}$ .

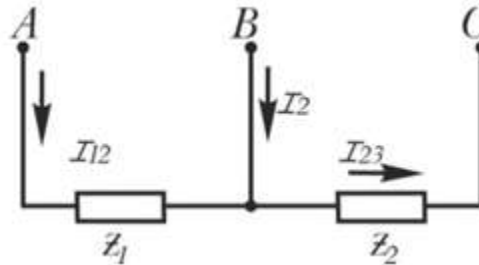


Рис. 8.5.2.4. Схема при асимметрии нагрузок фаз

### 8.6. Нагрузочная способность параллельно включенных кабелей различной проводимости

Условие равенства падений напряжения в двух параллельно включенных кабелях:

$$I_1 Z_1 = I_2 Z_2$$

Суммарный ток двух параллельно включенных кабелей:

$$I = I_1 \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right), \quad 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = K,$$

тогда допустимый суммарный  $I$  обоих кабелей:  $I_{\text{доп}} = I_{1\text{н}} \cdot K$ ,

где  $I_{1\text{н}}$  – номинальный ток кабеля, имеющего наибольшую проводимость.

Значения  $Z$  для трехжильных кабелей 6–10 кВ приведены в табл. 8.6.1.

Таблица 8.6.1

Трехжильные кабели 6–10 кВ

| S, мм <sup>2</sup> | Z, Ом/км |      | S, мм <sup>2</sup> | Z, Ом/км |      |
|--------------------|----------|------|--------------------|----------|------|
|                    | Al       | Cu   |                    | Al       | Cu   |
| 10                 | 3,35     | 1,9  | 95                 | 0,34     | 0,22 |
| 16                 | 1,97     | 1,19 | 120                | 0,27     | 0,18 |
| 25                 | 1,26     | 0,76 | 150                | 0,23     | 0,15 |
| 35                 | 0,90     | 0,55 | 185                | 0,19     | 0,13 |
| 50                 | 0,64     | 0,39 | 240                | 0,15     | 0,11 |
| 70                 | 0,45     | 0,28 |                    |          |      |

**Пример 8.6.1.** Включены параллельно два трехжильных кабеля 10 кВ (в земле): медный  $120 \text{ мм}^2$  и алюминиевый  $35 \text{ мм}^2$ . Кабели имеют одинаковую длину. Определить  $I_{\text{доп}}$ .

**Решение**

По табл. 8.6.1.  $Z_1 = 0,18$ ,  $Z_2 = 0,90$ ,

$$\frac{Z_1}{Z_2} = 0,2, K = 1 + 0,2 = 1,2, I_{1н} = 340 \text{ А}, I_{2н} = 125 \text{ А},$$

$$I_{\text{доп}} = 1,2 \cdot 340 = 408 \text{ А}.$$

Если загрузить на сумму  $I_{\text{ном}}(340 + 125)$ , то медный будет нагружен на  $465/1,2 = 387 \text{ А}$ .

**Пример 8.6.2.** Пропускную способность линии, выполненной алюминиевым кабелем  $95 \text{ мм}^2$  проложенной в траншее, необходимо довести до 265 А путем параллельной прокладки алюминиевого кабеля. Необходимо выбрать сечение кабеля.

**Решение**

По ПУЭ [33]:

$$I_{1н} = 225 \text{ А}, Z_1 = 0,34 \text{ Ом/км},$$

$$K = \frac{265}{225} = 1,17, \text{ т. е. } \frac{Z_1}{Z_2} = 0,17.$$

Отсюда  $Z_2 = 2,0$  или близкое значение  $Z_2 = 1,97$ ,  $S = 16 \text{ мм}^2$ .

## Глава 9. ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

### 9.1. Электрические сети

#### 9.1.1. Определение потерь в линиях и сетях

Потери в линиях и сетях определяются их технологическими параметрами и током нагрузки, кВт:

$$\Delta P_{\text{л}} = 1,1 \cdot n \cdot \rho \cdot I^2 \frac{L}{q_{\text{л}}} \cdot 10^{-3},$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий сопротивление переходных контактов, скрутку жил и способ прокладки линий;

$n$  – число фаз линий;

$L$  – длина линий, м;

$q_{\text{л}}$  – сечение провода, мм<sup>2</sup>;

$\rho$  – удельное сопротивление материала провода при 20 °С;

$I$  – среднее значение тока нагрузки, А.

Потери в трехфазных линиях и сетях определяются также по номограммам.

#### 9.1.2. Перевод электрических сетей на повышенное напряжение

Экономия электроэнергии в сети при переводе её на более высокое напряжение определяется, кВт·ч:

$$\Delta \mathcal{E} = 0,003 \rho L t \left( \frac{I_1^2}{q_1} - \frac{I_2^2}{q_2} \right),$$

где  $L$  – длина участка сети, на котором производится повышение номинального напряжения, м;  $I_1, I_2$  – средние значения токов в каждом проводе сети соответственно при низшем и высшем напряжении, А;

$\rho$  – удельное сопротивление материала провода – при 20 °С (для алюминия 0,026–0,029; для меди 0,0175–0,018; для стали 0,1–0,14 Ом · мм<sup>2</sup>/м;

$q_1, q_2$  – сечение проводов сети при низшем и высшем напряжении, мм<sup>2</sup> (при проведении мероприятий без замены проводов  $q_1 = q_2$ );

$t$  – расчетный период времени, ч.

**Пример 9.1.2.1.** Определить экономию электроэнергии в линии электропередачи от замены двигателя и сети с напряжением 380 В двигателем на 6000 В. Длина воздушной линии электропередачи от подстанции к двигателю составляет 800 м;

$q_1 = 120 \text{ мм}^2, q_2 = 25 \text{ мм}^2$ ; провода алюминиевые. Токи загрузки  $I_1 = 210 \text{ А}; I_2 = 15 \text{ А}$ .

Экономия электроэнергии в сети при  $t = 6000$  ч/год.

## Решение

$$\Delta \mathcal{E} = 0,003 \cdot 0,027 \cdot 800 \cdot 6000 \left( \frac{210^2}{120} - \frac{15^2}{25} \right) = 140\,000 \text{ кВт} \cdot \text{ч в год}$$

### 9.1.3. Реконструкция сетей

Экономия электроэнергии при проведении реконструкции сетей (замена сечения проводов, материала проводов, сокращения длины без изменения напряжения), кВт ч:

$$\Delta \mathcal{E} = 0,003 I^2 \left( \frac{\rho_1 L_1}{q_1} - \frac{\rho_2 L_2}{q_2} \right) t,$$

где  $I$  – среднеквадратичное значение тока нагрузки одной фазы, А;

$L_1, q_1, \rho_1$  – соответственно длина (м), сечение ( $\text{мм}^2$ ) и удельное сопротивление материала провода при  $20^\circ\text{C}$  ( $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ) данного участка до реконструкции;

$L_2, q_2, \rho_2$  – то же после реконструкции;

$t$  – расчетный период времени, ч.

### 9.1.4. Включение резервных линий электропередачи

Потери электроэнергии в сетях пропорциональны активному сопротивлению проводов, следовательно, при включении под нагрузку резервной линии потери снизятся в 2 раза, если длина, сечение провода и нагрузка основной и резервной ВЛ равны и схемы соответственно одинаковы.

### 9.1.5. Повышение коэффициента мощности электроустановок

Экономия электроэнергии при повышении коэффициента мощности от величины  $\cos\varphi_1$  до  $\cos\varphi_2$  :

$$\Delta \mathcal{E} = K \mathcal{E} (\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2), \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где  $K$  – экономический эквивалент реактивной мощности, который может быть принят равным:

- при питании через 3 трансформации – 0,12;
- при питании через 2 трансформации – 0,08;
- при питании через 1 трансформацию – 0,05;
- при питании генераторным напряжением – 0,02.

$\mathcal{E}$  – потребление активной энергии за расчетный период, кВт·ч.

## 9.2. Трансформаторы

### 9.2.1. Определение потерь электроэнергии в двухобмоточном трансформаторе

Потери электрической энергии в трансформаторе:

$$\Delta \mathcal{E}_a = \Delta P_0 T_{\Pi} + \Delta P_K K_3^2 T_{\text{раб}}, \text{ кВт ч,}$$

$$K_3 = \frac{\mathcal{E}_a}{S_H T_{\Pi} \cos \varphi_{\text{ср}}},$$

где  $\Delta P_0$  – потери холостого хода при номинальном напряжении, кВт;

$\Delta P_K$  – потери короткого замыкания при номинальной нагрузке, кВт;

$\mathcal{E}_a, \mathcal{E}_p$  – электроэнергия, учтенная за расчетный период по счетчикам – (кВт·ч, кВАр·ч);

$T_{\Pi}$  – полное число часов работы трансформатора, ч;

$T_{\text{раб}}$  – число часов работы трансформатора с номинальной нагрузкой (ч), которое принимается равным для предприятий, работающих в одну смену – 200, в две смены – 450, в три смены – 700 ч в месяц;

$\cos \varphi_{\text{ср}}$  – средневзвешенный коэффициент мощности (по тригонометрическим таблицам) из соотношения  $\text{tg} \varphi_{\text{ср}} = \mathcal{E}_p / \mathcal{E}_a$ ;

$S_H$  – номинальная мощность трансформатора, кВА.

### 9.2.2. Экономичный режим работы трансформаторов

Оптимальной принято считать такую загрузку трансформатора, которая соответствует максимальному значению его КПД. При этом электрические потери будут равны магнитным. В этом случае коэффициент загрузки трансформатора, при котором потери минимальны:

$$K_3 = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_K}}.$$

При работе трансформаторов должны учитываться потери активной мощности, возникающие не только в трансформаторах, но и по всей цепочке питания до генераторов электростанций. В этом случае:

$$K_3 = \sqrt{\frac{\Delta P_0^1}{\Delta P_K^1}},$$

где  $\Delta P_0^1 = \Delta P_0 + K_3 \Delta Q_0$  – приведенные потери холостого хода трансформатора, кВт;

$\Delta P_K^1 = \Delta P_K + K_3 \Delta Q_K$  – приведенные потери короткого замыкания, кВт;

$\Delta Q_0 = S_H I_0 / 100$  – реактивная мощность холостого хода трансформатора, кВАр;

$\Delta Q_K = S_H \cdot U_K / 100$  – реактивная мощность короткого замыкания, кВАр;

$I_0$  – ток холостого хода трансформатора по паспорту, %;

$U_K$  – напряжение короткого замыкания трансформатора по паспорту, %;

$K_3$  – коэффициент потерь, кВт/кВАр.

Примерные значения  $K_3$  в зависимости от места установки трансформаторов принимаются по табл. 9.2.2.1.

Таблица 9.2.2.1

## Коэффициент изменения потерь в трансформаторах

| Характеристика трансформатора и системы электроснабжения                        | K <sub>з</sub> , кВт/кВАр      |                               |
|---|--------------------------------|-------------------------------|
|   | в часы максимума энергосистемы | в часы минимума энергосистемы |
| Трансформаторы, питающиеся непосредственно от шин электростанций                | 0,02                           | 0,02                          |
| Сетевые трансформаторы, питающиеся от электростанций на генераторном напряжении | 0,07                           | 0,04                          |
| Понижающие трансформаторы 110/35/10 кВ, питающиеся от районных сетей            | 0,1                            | 0,06                          |
| Понижающие трансформаторы 10–6/0,4 кВ, питающиеся от районных сетей             | 0,15                           | 0,1                           |

Для трансформаторов типа ТМ мощностью 630–16000 кВА минимуму удельных приведенных потерь соответствует низкий коэффициент загрузки (0,4÷0,5). Но при этом возникает необходимость в установке дополнительных трансформаторов. Поэтому критерием рациональной загрузки является минимум затрат на трансформацию электрической энергии (оптимальный коэффициент загрузки для трансформаторов типа ТМ 1000/6 составляет  $K_3 = 0,64–0,9$ ) [47].

### 9.3. Электродвигатели

Снижение потерь электроэнергии в электродвигателях связано с тремя факторами:

1. Оптимальным проектированием, технологией и качеством изготовления электродвигателей.
2. Рациональным выбором системы электропривода с асинхронными двигателями.
3. Эксплуатацией электродвигателей.

Увеличение средней нагрузки рабочих машин снижает удельные расходы электроэнергии. При уменьшении нагрузки снижается КПД и  $\cos \varphi$  электродвигателя. При максимальном использовании рабочей машины (при отсутствии холостого хода и полной нагрузке машины) удельный расход энергии будет минимальным:

$$\Delta \mathcal{E}_0 = \frac{1 + \alpha(1 - \eta_n)}{\eta_n},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от типа и конструкции рабочей машины, равный 0,7–0,9;

$\eta_n$  – КПД рабочей машины при полной нагрузке.

Применение ограничителей холостого хода на станках, имеющих межоперационное время (время холостого хода) 10 с и более, всегда приводит

к экономии электроэнергии. Если средняя нагрузка электродвигателя составляет менее 45 % номинальной мощности, то замена его менее мощным электродвигателем всегда целесообразна и проверка расчетами не требуется. Значительную экономию электроэнергии дает управление частотой вращения электродвигателей.

#### 9.4. Электродвигатели сопротивления

Пути снижения удельных расходов электроэнергии на термообработку в печах сопротивления могут служить:

- снижение тепловых потерь и улучшение теплоизоляции печей;
- повышение производительности печей;
- уменьшение потерь на аккумуляцию тепла и применение предварительного нагрева изделий;
- рационализация электрических и технологических режимов работы печей.

Устранение неплотностей в загрузочных дверцах, отверстиях для термомпар, кирпичной кладке, сокращение работы печи с открытыми дверцами снижает потери тепла на излучение.

Потери электрической мощности на излучение тепла представлены в табл. 9.4.1.

Таблица 9.4.1

Потери электрической мощности на излучение тепла

| Температура печи, °С  | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
|---|-----|-----|-----|-----|------|
| Потери на излучение 1 м <sup>2</sup> поверхности отверстия, кВт | 17  | 27  | 39  | 57  | 78   |

**Пример 9.4.1.** Печь работает 5000 ч. в год, загрузочное окно 1,5 м<sup>2</sup>, температура внутри печи 800 °С. Время загрузки и разгрузки печи 1000 ч в год. После механизации загрузки печи время сократилось до 700 ч в год, площадь окна сократилась до 1 м<sup>2</sup>. Определить экономию электроэнергии.

#### Решение

До проведения указанных мероприятий потери на излучение составляли:

$$\Delta \mathcal{E}_1 = \Delta P_1 S_1 T_1 = 39 \cdot 1,5 \cdot 1000 = 58500 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год},$$

где  $\Delta P_1$  – потери мощности при  $t = 800$  °С.

После осуществления мероприятий:

$$\Delta \mathcal{E}_2 = \Delta P_1 S_2 T_2 = 39 \cdot 1 \cdot 700 = 27300 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Годовая экономия электроэнергии составила:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_1 - \Delta \mathcal{E}_2 = 58500 - 27300 = 31200 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Повышение мощности печи для изделий, которые необходимо нагревать до определенной температуры, как правило, снижает удельные расходы электроэнергии. Удельный расход электроэнергии:

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{0,85 P_{\text{п}}}{G}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг},$$

где  $P_{\text{п}}$  – мощность печи, определяемая по показаниям приборов, кВт;  
 $G$  – производительность печи, кг/ч.

Увеличение загрузки печи, например, в 2 раза за счет рациональной укладки деталей и других мероприятий сокращает удельные расходы электроэнергии на 40 %. Внедрение автоматизации, как показывает опыт, снижает удельные расходы электроэнергии от 20 до 50 %. Индукционный нагрев дает возможность избирательной термообработки отдельных участков изделий или осуществления поверхностной закалки, что обеспечивает резкое снижение удельных расходов электроэнергии.

В предварительных расчетах эффективности перевода нагрева заготовок с термических электропечей на индукционные установки можно принимать следующее снижение удельных расходов электроэнергии:

- при частоте до 10000 Гц – в 2 раза;
- при частоте свыше 10000 Гц – в 3 раза (поверхностная закалка).

## **9.5. Преобразователи повышенной частоты**

### **9.5.1. Замена машинных преобразователей статическими преобразователями**

Значительную экономию электроэнергии дает замена электромашинных преобразователей тиристорными преобразователями. Эксплуатация тиристорных преобразователей повышенной частоты в составе различных электротехнологических установок подтверждает их высокие технико-экономические показатели. В частности, благодаря более высокому коэффициенту полезного действия и отсутствию потерь холостого хода при том же технологическом эффекте на 10–15 % снижается потребляемая от питающей сети электроэнергия по сравнению с электромашинными преобразователями:

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{м}} - \mathcal{E}_{\text{т}} = P_{\text{в}} T_{\text{г}} \left( \frac{\eta_{\text{т}} - \eta_{\text{м}}}{\eta_{\text{м}} \eta_{\text{т}}} \right),$$

где  $P_{\text{в}}$  – выходная мощность преобразователя, кВт;  
 $T_{\text{г}}$  – годовое время работы преобразователя, ч;  
 $\eta_{\text{м}}$  – КПД машинного преобразователя;  
 $\eta_{\text{т}}$  – КПД тиристорного преобразователя.

Например, эксплуатация одного тиристорного преобразователя мощностью 500 кВт по сравнению с таким же по мощности электромашин-

ным при двухсменной работе и суммарном (по мощности и времени) коэффициенте использования 0,6 приводит к годовой экономии более 100 тыс. кВт·ч электроэнергии.

### 9.5.2. Снижение потерь электроэнергии в силовых кабелях

Для передачи тока повышенной частоты применяют специальный коаксиальный высокочастотный кабель (КВСП). Данные кабеля приведены в табл. 9.5.2.1.

Таблица 9.5.2.1

Параметры кабеля КВСП в расчете на метр длины

| Частоты, Гц | I, А | Z <sub>f</sub> | R <sub>f</sub> | X <sub>f</sub> | Потери мощности, Вт/м |
|-------------|------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|
|             |      | Ом/м           |                |                |                       |
| 2500        | 400  | 0,00102        | 0,000517       | 0,000879       | 82,8                  |
| 10000       | 300  | 0,00326        | 0,000897       | 0,00313        | 81                    |

При проектировании высокочастотных установок необходимо по возможности ближе располагать преобразователь частоты к закалочной установке, чтобы исключить потери мощности в силовых кабелях.

## 9.6. Экономия электроэнергии при выработке и использовании сжатого воздуха

### 9.6.1. Снижение номинального рабочего давления компрессорной установки

Потребление сжатого воздуха с давлением выше необходимого приводит к непроизводительному расходу электроэнергии, затраченной на его выработку. Понижение давления у потребителей сжатого воздуха может быть осуществлено с помощью редуктора, инжектора, дросселирования и регуляторов давления. Наиболее эффективно применение регуляторов давления. Потери энергия при использовании сжатого воздуха выше номинального определяются, кВт·ч/год:

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{1,1(P_1 - P_2)60 \cdot Q t}{367200 \eta_c \eta_{\text{э}} \eta_{\text{пр}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{у}}},$$

где  $P_1, P_2$  – работа сжатия 1 м<sup>3</sup> свежего воздуха, кгм/м<sup>3</sup>, в зависимости от давления определяются по характеристике компрессора;

$Q$  – подача компрессора, м<sup>3</sup>/мин;

$t$  – время работы компрессора, в год, ч;

$\eta_c, \eta_{\text{э}}, \eta_{\text{пр}}, \eta_{\text{м}}, \eta_{\text{у}}$  – КПД электрической сети, электродвигателя и передачи (0,8–0,99);  $\eta_{\text{м}} = 0,85–0,95$  – механический КПД компрессора;  $\eta_{\text{у}}$  – индикаторный КПД;

1,1 – коэффициент, учитывающий дополнительный расход электроэнергии в связи с износом компрессорной.

### **9.6.2. Внедрение прямоточных клапанов в поршневых компрессорах**

Многолетние испытания и накопленный опыт эксплуатации показали, что при установке прямоточных клапанов вместо кольцевых (пластинчатых) удельный расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха снижается в среднем на 13–16 %.

Годовой нерациональный расход электроэнергии компрессором вследствие использования кольцевых клапанов вместо прямоточных определяется по формуле, кВт·ч:

$$\Delta \mathcal{E} = 0,15 P_{\text{к}} t,$$

где  $P_{\text{к}}$  – мощность, потребляемая компрессором из сети, кВт,

$$P_{\text{к}} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi}{1000},$$

где  $U$  – напряжение сети, В;

$I$  – фактический ток электродвигателя компрессора, А;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности электродвигателя компрессора;

$t$  – время работы компрессора в год, ч.

### **9.6.3. Подогрев сжатого воздуха перед пневмоприемниками**

Одним из эффективных мероприятий по экономии электроэнергии при использовании сжатого воздуха является теплоизоляция воздухопровода, позволяющая подать потребителю сжатый воздух с повышенной температурой. При этом уменьшается расход воздуха и, следовательно, потери электроэнергии. Экономия электроэнергии в этом случае определяется по формуле, кВт·ч:

$$\Delta \mathcal{E} = 0,22 Q \Delta t^{\circ} \omega t,$$

где  $Q$  – расход сжатого воздуха, м<sup>3</sup>/мин;

$\Delta t^{\circ}$  – разность температуры до устройства теплоизоляции воздухопровода и после (в среднем за год), °С;

$\omega$  – удельный расход электроэнергии на выработку 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха, кВт·ч/м<sup>3</sup>;

$t$  – число часов работы компрессорной установки в год, ч.

### **9.6.4. Замена компрессоров старых конструкций на новые с более высокими КПД**

Применение компрессоров совершенных конструкций вместо устаревших дает большую экономию энергии, тыс. кВт·ч в год:

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{(P_1 - P_2) \cdot t}{10^3},$$

где  $t$  – время работы компрессора, ч, в год;

$P_1$  – мощность электродвигателя компрессора старой конструкции, кВт;

$P_2$  – мощность электродвигателя компрессора новой конструкции, кВт.

### 9.6.5. Сокращение утечек сжатого воздуха

Утечки сжатого воздуха происходят главным образом в трехходовых кранах и через отверстия в шлангах и зависят от давления в сети и диаметра отверстия.

Потери электроэнергии на утечки сжатого воздуха ориентировочно определяются, кВт·ч:

$$\Delta \mathcal{E} = \alpha n \omega t,$$

где  $\alpha$  – коэффициент расхода воздуха через неплотности арматуры и шлангов, м<sup>3</sup>/мин;

$n$  – количество точек, где требуется устранить утечки сжатого воздуха;

$t$  – время, в течение которого воздухопровод находится под давлением, ч;

$\omega$  – удельный расход электроэнергии на выработку 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха, кВт·ч.

## 9.7. Насосные установки

### 9.7.1. Повышение КПД насосов

Расчет экономии электроэнергии при замене устаревших малопроизводительных насосов насосами с высоким КПД производится по формуле:

$$\Delta \mathcal{E} = 0,00272 \frac{H}{\eta_d} \cdot \frac{1}{\eta_n'' - \eta_n'} Q T,$$

где  $H$  напор, м;

$Q$  – действительная подача насоса, м<sup>3</sup>/ч; .

$T$  – число часов работы насоса в год, ч;

$\eta_d$  – КПД электродвигателя;

$\eta_n''$ ,  $\eta_n'$  – КПД нового и заменяемого насоса.

Качественный ремонт насосов, тщательная балансировка рабочих колес, свежие уплотнения обеспечивают поддержание КПД насосов на уровне паспортных данных и минимальные удельные расходы электроэнергии на подачу воды.

### 9.7.2. Улучшение загрузки насосов и совершенствование регулирования их работы

Наименьший удельный расход электроэнергии на подачу воды наблюдается при максимальной подаче насоса. Максимальная подача насоса за-

висит от характеристики системы водоснабжения. Для обеспечения максимальной подачи необходимо сопоставление паспортных данных насоса с сопротивлением трубопроводов системы водоснабжения. В случае резких расхождений необходима замена насоса. Изменение (регулирование) режима работы насоса осуществляется:

- напорной или приемной задвижкой;
- изменением числа работающих насосов;
- изменением частоты вращения электродвигателя.

Наиболее экономичным способом регулирования является изменение числа работающих насосов, далее – регулирование частоты вращения насоса. Наиболее неэкономично регулирование с помощью задвижки. При этом в системах с преобразованием резкопеременных расходов рационально регулировать работу насосов изменением частоты вращения электродвигателя.

В системах с постоянным расходом более рациональным будет регулирование изменением числа работающих насосов. Использование задвижек для регулирования допускается только для мелких насосов, а также когда регулирование производится в течение небольшого числа часов в году.

### **9.7.3. Сокращение расхода и потерь воды**

Утечки через неплотности соединений трубопроводов и арматуры ведут к прямым потерям электроэнергии. Значение этих потерь определяется следующими способами:

1) при наличии расходомеров в начале и конце участка распределительной сети потери определяются разностью замеренных расходов воды за отчетный период в начале и конце участка. При разветвленной сети потери на отдельных участках суммируются;

2) при разветвленной сети с большим внутренним объемом потерю воды можно определить по точному расходомеру, отключив от сети всех потребителей.

Замеренные потери воды необходимо умножить на фактический удельный расход электроэнергии на подачу воды данной насосной. Полученное значение равно потерям электроэнергии, вызываемым плохим состоянием водопроводной сети.

Большое количество воды на промышленных предприятиях используется для охлаждения различных технологических установок. Вода для этих целей может использоваться многократно по замкнутому циклу. Внедрение оборотного водоснабжения может сократить расход первичной воды в 2 раза и обеспечить экономию электроэнергии на 15–20 %. Для уменьшения расхода воды рекомендуются следующие мероприятия:

– устройство системы испарительного охлаждения металлургических и термообработывающих печей;

- циркуляционные системы охлаждения сварочных аппаратов и высокочастотных установок;
- соблюдение установленных оптимальных температур воды, охлаждающей различные технологические агрегаты. Перепад температур прямой и обратной охлаждающей воды должен быть не менее 10–15 °С;
- устройство системы последовательного охлаждения отдельных технологических установок или их частей;
- применение схем автоматического управления подачи воды на охлаждение.

Все эти мероприятия могут снизить подачу воды насосными в 2–3 раза с соответствующим снижением расходов электроэнергии.

Экономический эффект от внедрения указанных мероприятий за год:

$$\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}(Q_1 - Q_2)T \cdot 10^{-3} \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч},$$

где  $\Delta\mathcal{E}$  – удельный расход электроэнергии на подачу воды, кВт · ч /м<sup>3</sup>;

$Q_1 - Q_2$  – расходы воды до внедрения мероприятий и после внедрения, м<sup>3</sup>/ч;

$T$  – число часов в году работы насосов, ч.

## 9.8. Вентиляционные установки

### 9.8.1. Замена вентиляторов старых типов на современные вентиляторы

Замена вентиляторов старых типов с низким КПД вентиляторами нового типа дает экономию электроэнергии:

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{hQ(\eta_2 - \eta_1)t}{102\eta_1\eta_2\eta_\varepsilon\eta_c},$$

где  $\eta_1, \eta_2$  – КПД заменяемого и устанавливаемого вентиляторов;  $\eta_\varepsilon, \eta_c$  – КПД электродвигателя и сети соответственно.

Характеристики некоторых вентиляторов приводятся в табл. 9.8.1.1.

Таблица 9.8.1.1

Характеристики вентиляторов

| Тип вентилятора | КПД  | h, мм. вод. ст. | Q, м <sup>3</sup> /мин |
|-----------------|------|-----------------|------------------------|
| ВМ-200          | 0,52 | 155–50          | 100–215                |
| ВМ-1            | 0,61 | 108–115         | 115–172                |
| ВЧПУ-100        | 0,52 | 140–30          | 30–180                 |
| СВМ-4:          |      |                 |                        |
| одна секция     | 0,74 | 85–40           | 70–110                 |
| две секции      | 0,7  | 170–60          | 110–140                |
| СВМ-5           | 0,7  | 130–60          | 80–200                 |
| СВМ-6           | 0,7  | 200             | 200–370                |

### **9.8.2. Внедрение экономичных способов регулирования подачи вентиляторов**

Значительные сокращения расхода электроэнергии вентиляторами обеспечиваются следующими мероприятиями:

1) применение многоскоростных электродвигателей вместо регулирования шиберами в напорной линии вентиляционной установки. Экономия энергии при этом составляет 20–30 %;

2) регулирование подачи воздуходувок шиберами на всосе вместо регулирования на нагнетании дает экономию электроэнергии до 15 %;

3) регулирование вытяжной вентиляции шиберами на рабочих местах вместо регулирования на нагнетании дает экономию электроэнергии до 10 %;

4) регулирование подачи дымососа с помощью цилиндрических направляющих аппаратов вместо дроссельного дает экономию до 25 %.

### **9.8.3. Блокировка вентиляторов тепловых завес с устройствами открывания и закрывания ворот**

Для сокращения расхода электроэнергии на привод вентиляторов тепловых завес в большинстве случаев рекомендуется заблокировать механизм тепловой завесы с устройствами открывания и закрывания ворот. Когда ворота открываются, автоматически включается тепловая завеса, а при закрывании ворот завеса отключается.

Когда рабочие места находятся близко от ворот, следует устанавливать на тепловые завесы двухскоростные электродвигатели, которые автоматически включаются на высшую скорость при открывании ворот и переключаются на низшую скорость при закрытых воротах. При этом мощность электродвигателя при работе на низшей скорости в 2 раза меньше, чем на высшей скорости. Обычно тепловая завеса работает на пониженной скорости вентилятора (60–70 % общего количества часов работы). Если принять отопительный сезон продолжительностью 4000 ч/год и мощность электродвигателя 10 кВт, то электродвигатель должен работать с половинной мощностью 5 кВт – 2400 ч. Экономия электроэнергии при этом  $\Delta \text{Э} = 5 \cdot 1600 = 8000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  в год.

Отключение вентиляционных установок во время обеденных перерывов и пересмен дает нередко экономию электроэнергии до 20 %.

### **9.8.4. Улучшение работы вентиляторов**

Потери электроэнергии в вентиляторной установке можно снизить за счет изменения частоты вращения вала, угла установки лопаток на рабочем колесе, поворотом лопаток направляющего аппарата и др.

Экономия электроэнергии при этом, кВт·ч:

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{(Q_1 h_1 \eta_1 - Q_2 h_2 \eta_2) t}{102 \eta_1 \eta_2 \eta_{\text{э}} \eta_{\text{с}} \eta_{\text{пр}}},$$

где  $Q_1, Q_2$  – подача вентилятора до и после изменения режима его работы, которая определяется по совмещенным характеристикам вентилятора и вентиляционной сети, м<sup>3</sup>/с;

$h_1, h_2$  – давление вентилятора до и после изменения режима;

$\eta_{\text{э}}, \eta_{\text{с}}, \eta_{\text{пр}}$  – КПД электродвигателя, передачи и электрической сети (указанными коэффициентами при переходе на новый режим работы вентилятора для практических расчетов можно пренебречь);

$\eta_1, \eta_2$  – КПД вентилятора до и после изменения режима.

### **9.8.5. Внедрение автоматического управления вентиляционными установками**

1. Устройство блокировки индивидуальных вытяжных систем снижает расход электроэнергии на 25–30 %.

2. Устройство блокировки вентилятора воздушных завес с механизмом открывания ворот может дать экономию электроэнергии до 70 % .

3. Устройство автоматического регулирования и управления вентиляционными установками в зависимости от температуры наружного воздуха дает экономию электроэнергии до 10–15 %.

## **9.9. Электросварочные установки**

### **9.9.1. Оптимальный выбор способа электросварки**

Перевод сварки с постоянного тока на переменный обеспечивает снижение удельных расходов электроэнергии. При предварительных расчетах эффективности перевода можно принимать снижение удельных расходов электроэнергии на 1 кг наплавленного металла:

– для ручной дуговой сварки – 2,9 кВт·ч/кг;

– для автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом – 2,0 кВт·ч/кг.

Замена ручной сварки на автоматическую под слоем флюса обеспечивает снижение удельных расходов электроэнергии на 1 кг наплавленного металла при переменном токе на 0,17 кВт·ч/кг и при постоянном токе на 0,65 кВт·ч/кг.

Замена ручной дуговой сварки на точечную контактную сварку требует конструктивных изменений свариваемых изделий и установки специальных сварочных машин. Резкое повышение производительности сварки и значительное снижение расхода электроэнергии, как правило, окупают за-

траты, связанные с изменением технологии сварки. Эффективность перехода на точечную контактную сварку оценивается снижением расхода электроэнергии в 2–2,5 раза.

Замена ручной дуговой сварки на контактную шовную сварку снижает расход электроэнергии на 15 %.

### 9.9.2. Устранение или сокращение холостого хода сварочных агрегатов

Внедрение различных схем ограничения холостого хода сварочных трансформаторов или преобразователей обеспечивает годовую экономию электроэнергии 6–20 тыс. кВт · ч в год на каждую установку. В предварительных расчетах эффективности внедрения подобных мероприятий можно принимать экономию от 15 до 20 % в зависимости от режима работы установки.

### 9.9.3. Совершенствование технологии электросварки

Применение электродов с покрытием, в которое введен железный порошок, позволяет значительно увеличить силу сварочного тока, повысить производительность труда и снизить удельный расход электроэнергии. Эти электроды позволяют увеличить коэффициент наплавки до 12–20 г/(А·ч), т.е. снизить удельные расходы электроэнергии примерно на 8 %. Применение рутиловых электродов повышает производительность труда на 12 % и улучшает качество сварочных швов. Ориентировочная экономия электроэнергии в этом случае достигает 10 %. Замена электродной, сплошной проволоки на порошковую повышает производительность труда на 10–15 % и снижает удельный расход электроэнергии на 8–12 %. Применение полуавтоматической и автоматической сварки в среде углекислого газа обеспечивает высокую производительность за счет глубокого снижения проплавления основного металла и малой доли сварочной проволоки в металле сварочного шва (табл. 9.9.3.1).

Таблица 9.9.3.1

Сравнительные данные ручной и дуговой сварки

| Электросварка  | Установленная мощность, % | Удельный расход электроэнергии, % | Скорость сварки, % |
|--|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Ручная дуговая на постоянном токе (однопостовый генератор) | 100                       | 100                               | 100                |
| Полуавтоматическая в среде углекислого газа                | 250                       | 55                                | 300                |

Автоматическая дуговая сварка под флюсом является наиболее распространенным способом сварки. Для повышения производительности и сни-

жения удельных расходов электроэнергии применяют присадку во флюсе в виде металла в порошке, металлической стружки или рубленой проволоки. Используется увеличение плотности сварочного тока. Все это позволяет снизить удельный расход электроэнергии на 30–40 %. Электрошлаковая сварка на переменном токе применяется для соединения деталей толщиной более 30–40 мм. Отсутствие открытой дуги при электрошлаковой сварке обеспечивает устойчивость процесса на переменном токе и наиболее полное использование электроэнергии. Потери на нагрев флюса малы, отсутствуют разбрызгивание и угар металла. Коэффициент наплавки при электрошлаковой сварке составляет 25–30 г/(А·ч).

Удельный расход электроэнергии на сварку обратно пропорционален коэффициенту наплавки.

## 9.10. Рациональное использование осветительных установок

### 9.10.1. Правильный выбор типа ламп и светильников

В настоящее время широкое распространение получили газоразрядные лампы, более экономичные, чем лампы накаливания. Лампы накаливания имеют низкий энергетический КПД; видимое излучение их не более 6 % потребляемой мощности, а газоразрядные лампы имеют более высокий КПД, равный 17 % и более. При замене ламп накаливания люминесцентными лампами и лампами ДРЛ каждое предприятие может повысить освещенность рабочих мест более чем вдвое и от этого получить реальную экономию и улучшить условия труда работающих. В табл. 9.10.1.1 приведены данные о мощности и световом потоке ламп накаливания, люминесцентных и дуговых ртутных ламп.

Таблица 9.10.1.1

Мощность и световой поток различных источников света

| Лампы накаливания |                    | Люминесцентные лампы |                    | Дуговые ртутные лампы (ДРЛ) |                    |
|-------------------|--------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| Мощность, Вт      | Световой поток, лм | Мощность, Вт         | Световой поток, лм | Мощность, Вт                | Световой поток, лм |
| 15                | 105                | 15                   | 630                | –                           | –                  |
| 25                | 205                | 30                   | 1740               | –                           | –                  |
| 40                | 430                | 40                   | 2480               | –                           | –                  |
| 75                | 950                | 80                   | 4320               | 80                          | 2950               |
| 100               | 1380               | 125                  | 6200               | 125                         | 5200               |
| 150               | 1900               | 150                  | 8000               | –                           | –                  |
| 200               | 2700               | 200                  | 10000              | 250                         | 11000              |
| 300               | 4350               | –                    | –                  | 400                         | 18000              |
| 500               | 8100               | –                    | –                  | –                           | –                  |
| 750               | 13100              | –                    | –                  | 700                         | 35000              |
| 1000              | 18200              | –                    | –                  | 1000                        | 50000              |

При выборе люминесцентных ламп следует учитывать, что наиболее экономичными являются люминесцентные лампы ЛБ (табл. 9.10.1.2). Лампы ЛБ не только более экономичны, но и более универсальны и широко применяются в различных электроосветительных установках. Во всех промышленных осветительных установках следует, как правило, применять газоразрядные источники света (люминесцентные, ртутные, металлогалогенные и натриевые лампы).

Сопоставление энергетической эффективности различных источников света между собой для ориентировочной оценки экономии электроэнергии, возможной при замене ламп с учетом допусков на расчетную освещенность, приведено в табл. 9.10.1.3.

Таблица 9.10.1.2

Мощность и световой поток люминесцентных ламп

| Типы ламп               | Мощность лампы, Вт | Световой поток лампы, лм |
|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| АБ-15                   | 15                 | 630                      |
| ЛХБ-15, ЛД-15, ЛДЦ-15-1 | 15                 | 430–600                  |
| ЛБ-20                   | 20                 | 980                      |
| ЛХБ-20, ЛД-20, ЛДЦ-20-1 | 20                 | 620–900                  |
| ЛБ-30                   | 30                 | 1740                     |
| ЛХБ-30, ЛД-30, ЛДЦ-30-1 | 30                 | 1110–1500                |
| ЛБ-40                   | 40                 | 2480                     |
| ЛХБ-40, ЛД-40, ЛДЦ-40-1 | 40                 | 1520–2200                |
| ЛБ-65                   | 65                 | 3970                     |
| ЛБ-80                   | 80                 | 4320                     |
| ЛХБ-80, ЛД-80, ЛДЦ-80-1 | 80                 | 2720–3840                |
| ЛХБ-125                 | 125                | 6200                     |
| ЛХБ-150                 | 150                | 8000                     |
| ЛХБ-200                 | 200                | 10000                    |
| ЛБЖ-80                  | 80                 | 4320                     |
| ЛБЖ-110                 | 110                | 6000                     |
| ЛБЖ-150                 | 150                | 8000                     |

Таблица 9.10.1.3

Возможная экономия электроэнергии

| Заменяемые источники света                      | Возможная экономия электроэнергии, % |                           |
|---|--------------------------------------|---------------------------|
|   | Возможные пределы экономии           | Среднее значение экономии |
| Люминесцентные лампы на металлогалогенные лампы | От -10 до + 43,0                     | 24                        |
| Ртутные лампы на:                               |                                      |                           |
| металлогалогенные лампы                         | От + 22,0 до + 53,0                  | 42                        |
| люминесцентные лампы                            | От -30 до +42,0                      | 22                        |
| натриевые лампы                                 | От + 26, 0 до + 59,0                 | 45                        |
| Лампы накаливания на:                           |                                      |                           |
| металлогалогенные лампы                         | От + 55 до + 75,0                    | 66                        |
| люминесцентные лампы                            | От + 40 до + 63,0                    | 55                        |
| ртутные лампы                                   | От + 23 до + 57,0                    | 42                        |
| натриевые лампы                                 | От + 57 до +76                       | 68                        |

*Примечание.* Знак «+» соответствует экономии электроэнергии, а знак «-» – перерасходу, возможному в случае замены варианта с менее эффективным источником света.

### 9.10.2. Включение источников света в дневное время

При включении источников света в дневное время из-за нарушения графиков включения и отключения освещения потери энергии определяются по установленной мощности освещения данного цеха или участка и по числу часов дневного времени, кВт·ч:

$$\Delta E_{\text{осв}} = P_{\text{кс}}(8760 - T_{\text{ос}}),$$

где  $P$  – мощность всех ламп данного вида осветительной нагрузки (рабочее, аварийное, охранное и т.д.), кВт;

$k_c$  – коэффициент спроса осветительных нагрузок в зависимости от характера производственного помещения (табл. 9.10.2.1);

$T_{\text{ос}}$  – число часов использования максимума (табл. 9.10.2.2).

Таблица 9.10.2.1

#### Коэффициент спроса осветительной нагрузки

| Наименование объектов   | $K_c$ |
|---|-------|
| Мелкие производственные здания и торговые помещения                               | 1,0   |
| Производственные здания, состоящие из ряда отдельных помещений                    | 0,95  |
| Производственные здания, состоящие из отдельных крупных пролетов                  | 0,95  |
| Библиотеки, административные здания, предприятия общественного питания            | 0,9   |
| Учебные, детские и лечебные учреждения, конторские, бытовые и лабораторные здания | 0,8   |
| Складские помещения, электроподстанции  | 0,6   |

Таблица 9.10.2.2

#### Использование максимума осветительной нагрузки

| Род осветительной нагрузки                                    | $T_{\text{ос}}, \text{ч}$ |
|---|---------------------------|
| Внутреннее освещение  |                           |
| Рабочее освещение для местности с широтой 56°:                |                           |
| при одной смене   | 250                       |
| при двух сменах   | 1850                      |
| при трех сменах   | 4000                      |
| Аварийное общее освещение                                     | 4800                      |
| Наружное освещение  |                           |
| Рабочее освещение заводских территорий, включаемое ежедневно: |                           |
| на всю ночь   | 3800                      |
| до 1 ч  | 2450                      |
| до 24 ч   | 1750                      |
| То же включаемое в рабочие дни:                               |                           |
| на всю ночь   | 3000                      |
| до 1 ч  | 2000                      |
| до 24 ч   | 1750                      |
| Охранное освещение, включаемое ежедневно на всю ночь          | 3500                      |

| Род осветительной нагрузки                                  | T <sub>ос</sub> , ч |
|---|---------------------|
| Рабочее освещение территории поселка, включаемое ежедневно: |                     |
| на всю ночь   | 3500                |
| до 1 ч  | 2350                |
| до 24 ч   | 1950                |

### 9.10.3. Загрязнение светильников

Загрязнение светильников веществами, находящимися в воздухе производственных помещений, – пылью, грязью, конденсатом паров и газов – приводит к резкому снижению их КПД и изменению формы кривой силы света.

В пыльных и грязных производствах наблюдаются случаи понижения освещенности в 8–10 раз. Поэтому постоянное поддержание светильников в надлежащей чистоте имеет огромное значение для рационального использования электроэнергии в электроосветительных установках.

Очистка ламп и светильников производится в сроки, определяемые лицом, ответственным за электрохозяйство, в зависимости от местных условий. В ПУЭ и ведомственных инструкциях имеются указания о рекомендуемой периодичности чистки светильников (табл. 9.10.3.1).

Таблица 9.10.3.1

#### Сроки очистки светильников

| Помещения  | Сроки чистки светильников |
|--|---------------------------|
| В помещениях со значительным выделением пыли, дыма и копоти: цехи доменные, мартеновские, литейные, кузнечные, цементных заводов; подготовительные отделы текстильных фабрик; обогатительные фабрики и др. | 2 раза в 1 мес.           |
| В помещениях со средним выделением пыли, дыма и копоти: цехи прокатные, механические, сборочные, металлоконструкций и др.  | 1 раз в 3 мес.            |
| В помещениях с незначительным выделением пыли: цехи предприятий легкой и пищевой промышленности, административно-конторские помещения, лаборатории, конструкторские и проектные залы.                      | 1 раз в 3 мес.            |
| Установки наружного освещения.   | 1 раз в 4 мес.            |

Нарушение норм периодичности чистки светильников наносит крупный ущерб из-за резкого снижения освещенности производственных помещений. Приходится устанавливать лампы повышенной мощности, увеличивать число светильников, расходовать излишнее количество электроэнергии.

### 9.10.4. Поддержание номинальных уровней напряжения в осветительной сети

Колебания напряжения приводят к перерасходу электроэнергии. Напряжение на выводах ламп не должно быть выше 105 % и ниже 85 % номинального напряжения.

Снижение напряжения на 1 % вызывает уменьшение светового потока ламп: накаливания на 3–4 %, люминесцентных ламп на 1,5 % и ламп ДРЛ на 2,2 %. Перенапряжение сети приводит к увеличению потребляемой энергии осветительными установками. Значение возможного перерасхода электроэнергии приведено в табл. 9.10.4.1.

Таблица 9.10.4.1

Увеличение потребляемой энергии от перенапряжения

| Увеличение потребляемой мощности<br>$\Delta P/P_n$ % номинальной мощности для ламп | Перенапряжение $\Delta U/U_n$ % |     |     |     |      |      |      |
|--|---------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|
|  | 0                               | 1   | 2   | 3   | 5    | 7    | 10   |
| Накаливания  | 0                               | 1,6 | 3,2 | 4,7 | 8,1  | 11,5 | 16,4 |
| Люминесцентных   | 0                               | 2,0 | 4,0 | 6,0 | 10,0 | 14,0 | 20,0 |
| Ртутных  | 0                               | 2,2 | 5,0 | 7,0 | 12,0 | 18,0 | 24,0 |

Зависимость снижения срока службы ламп и увеличение количества ламп, необходимых для эксплуатации осветительных установок, от величины перенапряжения приведено в табл. 9.10.4.2.

Таблица 9.10.4.2

Зависимость снижения срока службы ламп от перенапряжения

| Лампы                         | Перенапряжение $\Delta U/U_n$ % |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                               | 0                               | 1    | 2    | 3    | 5    | 7    | 10   |
| Относительный срок службы     |                                 |      |      |      |      |      |      |
| Накаливания                   | 100                             | 87,1 | 75,8 | 56,2 | 50,5 | 38,7 | 7,8  |
| Газоразрядные                 | 100                             | 95,0 | 93,0 | 90,0 | 85,0 | 80,0 | 73,0 |
| Относительное количество ламп |                                 |      |      |      |      |      |      |
| Накаливания                   | 100                             | 114  | 132  | 151  | 198  | 258  | 1284 |
| Газоразрядные                 | 100                             | 105  | 108  | 111  | 118  | 125  | 137  |

Для устранения влияния колебаний напряжения на эффективность осветительной установки применяют отдельные трансформаторы для осветительной нагрузки и компенсирующие устройства, включаемые и отключаемые строго по суточному графику. В последнее время для стабилизации напряжения в осветительных установках находит применение автоматическое регулирование напряжения. Для промышленных, осветительных электросетей разработаны и широко применяются автоматическое регулирование напряжения с помощью последовательно регулируемых трансформаторов и включение в сеть дополнительной индуктивности.

## **9.11. Экономия электроэнергии при эксплуатации электрифицированного транспорта**

### **9.11.1. Внедрение рекуперативного торможения электровозов**

При движении поезда на выбег тяговые двигатели электровозов работают генераторами, отдавая выработанную ими электроэнергию в контактную сеть.

Количество рекуперированной (возвращаемой) в сеть электроэнергии определяется, кВт·ч:

$$\mathcal{E}_p = IUt,$$

где  $I$  – ток рекуперации, А;

$U$  – напряжение контактной сети, В;

$t$  – время следования поезда по спуску, ч

Значение тока рекуперации определяется по токовой характеристике электровоза, работающего на рекуперативном режиме для данной позиции рукоятки контроллера и скорости движения.

### **9.11.2. Влияние использования подвижного состава на расход электроэнергии на железнодорожном транспорте**

Увеличение на 1 % массы поезда дает снижение расхода электроэнергии (10 тыс. т·км-брутто): в грузовом движении – на 0,222 %, в пассажирском – на 0,54 %.

Снижение на 1 % порожнего пробега вагонов к общему пробегу в грузовом движении уменьшает удельный расход электроэнергии на 0,454 %.

Снижение одиночного пробега электровозов (одиночное следование, двойная тяга, подталкивание) на 1 % сокращает удельный расход электроэнергии на 0,24 %.

Снижение простоя электровозов в рабочем состоянии на 1 % уменьшает удельный расход электроэнергии на 0,6 %. Изменение всех перечисленных показателей в обратном направлении вызывает соответственно увеличение расхода электроэнергии.

Внедрение в трамваях и троллейбусах автоматики управления режимом работы печей.

Установка автоматических устройств режима печей в зависимости от температуры наружного воздуха дает снижение расхода электроэнергии на обогрев пассажирских салонов и рабочих мест на 10–25 % потребляемой подвижным составом энергии.

### **9.11.3. Снижение пусковых (реостатных) потерь электроэнергии в трамвае и троллейбусе**

Снижение пусковых (реостатных) потерь электроэнергии в трамвае и троллейбусе возможно при:

- ликвидации лишних остановочных пунктов на трассе трамвая или троллейбуса;
- сокращении дополнительных остановок на перегоне между основными остановками;
- стремлении к более быстрому выходу на автоматическую характеристику (при наименьшей скорости) путем повышения пускового ускорения, допускаемого условиями пуска.

Увеличение пускового периода на 1 с увеличивает потери электроэнергии в реостате на 12,5 Вт·ч, на 2000–2500 кВт·ч в год для одного поезда. Кроме того, экономное вождение поездов, трамвая и троллейбуса значительно сокращает расход электроэнергии на движение (максимальное использование выбега и доведение до минимума тормозных потерь).

### **9.11.4. Внутрицеховой и межцеховой транспорт**

Уровень потребления электроэнергии на отдельных производствах достигает 10 % общего расхода цеха.

В литейных, прессовых, кузнечных, сборочных и других цехах значительный расход электроэнергии приходится на транспортные средства (мостовые краны, конвейеры и др.).

Одна из причин непроизводительного расхода электроэнергии заключается в том, что грузоподъемность используемых кранов нередко в несколько раз выше массы перевозимых грузов.

Например, на одном заводе в прессовом цехе установлен кран грузоподъемностью 60 т с установленной мощностью 75 кВт, максимальный же перевозимый груз не превышает 7 т; следовательно, в цехе следует установить второй кран грузоподъемностью 10–12 т для повседневной работы, а кран грузоподъемностью 60 т использовать только для ремонта крупных прессов и перевозки тяжелых грузов. В этом случае проведенные испытания показали, что месячный расход электроэнергии снизится с 5600 до 600 кВт·ч, что дает годовую экономию более 60 тыс. кВт·ч.

На многих промышленных предприятиях для транспортировки изделий широкое применение находят подвесные конвейеры. Как установлено проверкой, на ряде предприятий потребление электроэнергии подвесными конвейерами в 5 раз меньше, чем мостовыми кранами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдулов, Н.А. Устройство автоматического повторного включения на нефтеперерабатывающих предприятиях / Н.А. Абдулов // Промышленная энергетика. – 1976. – № 12. – С. 21–24.
2. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. – М.: Энергоиздат, 1982.
3. Андриянов, В.Н. Практикум по электрическим машинам и аппаратам / В.Н. Андриянов. – М.: Колос, 1969.
4. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973.
5. Бутырин, П.А. Электротехника: учеб. пособие для вузов в 3 т. Т. 3. Электроприводы. Электроснабжение / под ред. А.П. Бутырина, Р.Х. Гафиятулина, А.Л. Шестакова. – Челябинск: ЮУрГУ, 2005.
6. Гейлер, Л.Б. Справочник электрика промышленных предприятий / Л.Б. Гейлер. – Минск, 1963.
7. Грейсух, М.В. О пуске трехфазных двигателей напряжением до 1000 В / М.В. Грейсух // Промышленная энергетика. – 1969. – № 7.
8. Гемке, Р.Г. Неисправности электрических машин / Р.Г. Гемке. – Л.: Энергия, 1969.
9. Гольстрем, В.А. Справочник энергетика промышленных предприятий / В.А. Гольстрем, А.С. Иваненко. – Киев: Техника, 1977.
10. Дьяков, В.И. Типовые расчеты по электрооборудованию / В.И. Дьяков. – М.: Высшая школа, 1976.
11. Ильин, Н.М. Электрооборудование автомобилей / Н.М. Ильин. – М.: Транспорт, 1975.
12. Каждан, А.Э. Предельная мощность трансформаторов заводских подстанций / А.Э. Каждан // Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок. – 1982. – № 2.
13. Карвовский, Т.А. Справочник по асинхронным двигателям и пуско-регулирующей аппаратуре / Т.А. Карвовский, С.П. Огороков. – Л.: Энергия, 1969.
14. Карпов, Ф.Ф. Регулирование напряжения в электросетях промышленных предприятий / Ф.Ф. Карпов, Л.А. Солдаткина. – М.: Энергия, 1970.
15. Кашкалов, В.И. Самовозбуждение асинхронных двигателей при наличии компенсирующей емкости / В.И. Кашкалов // Промышленная энергетика. – 1971. – № 7.
16. Кисаримов, Р.А. Справочник электрика / Р.А. Кисаримов. – М.: Радиософт, 2000.
17. Коломейцев, К.З. Тиристорное устройство для защиты электродвигателей от работы на двух фазах / К.З. Коломейцев, В.Б. Фельдман // Промышленная энергетика. – 1981. – № 1.

18. Комаров, А.Ф. Наладка и эксплуатация электрооборудования металлорежущих станков / А.Ф. Комаров. – М.: Машиностроение, 1974.
19. Константинов, Б.А. Коэффициент мощности и способы его улучшения на промышленных предприятиях / Б.А. Константинов, К.И. Соколова, Г.Н. Шулятьева. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959.
20. Константинов, Б.А. Компенсация реактивной мощности / Б.А. Константинов, Г.З. Зайцев. – М.: Энергия, 1976.
21. Копытов, Ю.В. Экономия электроэнергии в промышленности / Ю.В. Копытов, Б.А. Чуланов. – М.: Энергия, 1982.
22. Кузнецов, М.И. Основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1970.
23. Кузнецов, Б.В. Справочное пособие заводского электрика / Б.В. Кузнецов, М.Ф. Сацукевич. – Минск: Беларусь, 1978.
24. Кулик, Ю.А. Электрические машины: учеб. пособие для втузов / Ю.А. Кулик. – М.: Высшая школа, 1971.
25. Кулик, Ю.А. Электрические машины: учеб. пособие для втузов / Ю.А. Кулик. – М.: Энергоиздат, 1981.
26. Куприц, Ю.А. Схема защиты минимального напряжения / Ю.А. Куприц // Промышленная энергетика. – 1977. – № 4.
27. Лебедев, Г.Г. Определение параметров асинхронного двигателя напряжением до 1000 В при отсутствии паспорта / Г.Г. Лебедев // Промышленная энергетика. – 1981. – № 2.
28. Литвак, Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях / Л.В. Литвак. – М.: Госэнергоиздат, 1963.
29. Мадьяр, Л. Коэффициент мощности / Л. Мадьяр. – М.: Госэнергоиздат, 1961.
30. Пиотровский, Л.И. Электрические машины / Л.И. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1974.
31. Полупроводниковые выпрямители / под ред. Ф.И. Ковалева, Г.П. Москвой. – М.: Энергия, 1978.
32. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Атомиздат, 1972.
33. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
34. Радин, В.И. Разработка новых серий электрических машин / В.И. Радин // Электротехника. – 1983. – № 11.
35. Сарваров, А.С. Основы реализации трансформаторно-тиристорных пусковых устройств для высоковольтных асинхронных электроприводов (монография) / А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, М.В. Вечеркин. – Магнитогорск, 2013.
36. Смирнов, А.Д. Справочная книжка энергетика / А.Д. Смирнов, К.М. Антипов. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

37. Справочник по наладке электрооборудования электростанций и подстанций / под ред. Э.С. Мусаэляна. – М.: Энергия, 1971.
38. Справочные данные по электрооборудованию. В 2 т. Т. 1. Электрические машины общего применения. – М.-Л.: Энергия, 1964.
39. Справочник по наладке электроустановок и электроавтоматики. – Киев: Наукова думка, 1972.
40. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.А. Федорова и Г.В. Сербиновского. – М.: Энергия, 1981.
41. Справочник по основам электронной техники / под ред. Б.С. Гершунского. – Киев, 1979.
42. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. В 2 т. Т. 2. – М.: Энергия, 1973.
43. Лебедев, Г.Г. Справочник заводского электрика / Г.Г. Лебедев. – Челябинск, 2010.
44. Справочник по электроизмерительным приборам. – 3-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
45. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 1 / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
46. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
47. Федоров, А.А. О коэффициенте загрузки трансформаторов и использовании трансформаторной мощности / А.А. Федоров, М.В. Кудрук // Промышленная энергетика. – 1980. – № 2.
48. Федоров, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федорова. – М.: Энергия, 1972.
49. Чебовский, О.Г. Силовые полупроводниковые приборы: справочник / О.Г. Чебовский. – М.: Энергия, 1975.
50. Чернопяттов, Н.И. Фазирование электрических машин переменного тока / Н.И. Чернопяттов, Г.А. Петров, В.Ф. Емец // Промышленная энергетика. – 1972. – № 1.
51. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1981.
52. Шамо́в, А.Н. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок / А.Н. Шамо́в, В.А. Бодажков. – Л.: Машиностроение, 1974.
53. Шварц, И.Г. О нагрузочной способности параллельно включенных кабелей различной проводимости / И.Г. Шварц // Промышленная энергетика. – 1971. – № 4.
54. Шипуль, П.Т. Спутник электрика / П.Т. Шипуль. – Минск: Ураджай, 1978.
55. Электротехнический справочник. В 3 т. Т. 1–3 / гл. ред. проф. И.Н. Орлов. – М.: Энергия, 1980–1982.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### П. 1. Форматы и масштабы

Форматы листов конструкторской документа определяются по ГОСТ 7 2.301 размерами внешней рамки, выполненной сплошной тонкой линией. В табл. П.1 указаны размеры основных форматов, образованных последовательным делением формата 44 (1182 x 841) площадью 1 м<sup>2</sup> на две равные части.

Таблица П.1

Обозначения и размеры формата

| Обозначение<br>основного формата | 44         | 24        | 22        | 12        | 11        |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Размеры сторон формата           | 1189 x 841 | 594 x 841 | 594 x 420 | 297 x 420 | 297 x 210 |
| Формат бумаги                    | A0         | A1        | A2        | A3        | A4        |

Допускается применение дополнительных форматов, образуемых увеличением сторон основных форматов на длину, кратную размерам формата 11 и определяемую целым числом. Обозначение форматов составляется из двух чисел, первое из которых указывает кратность стороны формата к 297 мм, а второе – кратность другой стороны формата к 210 мм.

Масштабы изображений на чертежах (кроме печатных изданий и фотографий) определяются наряду с натуральным масштабом (М 1:1) следующим рядом (по ГОСТ 2.302).

Масштабы уменьшения: 1:2; 1:2,5; 1:4; 1:5; 1:10; 1:15; 1:20; 1:25; 1:40; 1:50; 1:75; 1:100; 1:200; 1:400; 1:500; 1:800; 1:1000.

Масштабы увеличения: 2:1; 2,5:1; 4:1; 5:1; 10:1; 20:1; 40:1; 50:1; 100:1.

### П. 2. Тригонометрические функции острого угла

Решение всяких треугольников в конечном счете сводится к решению прямоугольных треугольников. Отношения различных пар сторон прямоугольного треугольника (рис. П.2.1) и называются тригонометрическими функциями его острого угла. По отношению к углу  $A$  эти функции получают следующие обозначения:

$$\sin A = \frac{a}{c} \text{ – (отношение противолежащего катета к гипотенузе).}$$

$$\cos A = \frac{b}{c} \text{ – (отношение прилежащего катета к гипотенузе).}$$

$$\operatorname{tg} A = \frac{a}{b} \text{ – (отношение противолежащего катета к прилежащему).}$$

$$\operatorname{ctg} A = \frac{b}{a} \text{ – (отношение прилежащего катета к противолежащему).}$$

Значение синусов, косинусов, тангенсов и котангенсов острого угла (от 0° до 90°) приведены в табл. П.2.

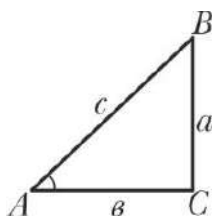


Рис. П.2.1. К определению тригонометрических функций угла

Таблица П.2

Значения тригонометрических функций от 0° до 90°

| $\angle A$ | $\sin A$ | $\cos A$ | $\operatorname{tg} A$ | $\operatorname{ctg} A$ |
|------------|----------|----------|-----------------------|------------------------|
| 0°         | 0,0000   | 1,0000   | 0,0000                | $\infty$               |
| 5°         | 0,0872   | 0,9962   | 0,0875                | 11,43                  |
| 10°        | 0,1736   | 0,9848   | 0,1763                | 5,671                  |
| 15°        | 0,2588   | 0,9659   | 0,2679                | 3,732                  |
| 20°        | 0,3420   | 0,9397   | 0,3640                | 2,747                  |
| 25°        | 0,4226   | 0,9063   | 0,4663                | 2,145                  |
| 30°        | 0,5000   | 0,8660   | 0,5774                | 1,732                  |
| 35°        | 0,5736   | 0,8192   | 0,7002                | 1,4282                 |
| 40°        | 0,6428   | 0,7660   | 0,8391                | 1,1918                 |
| 45°        | 0,7071   | 0,7071   | 1,0000                | 1,0000                 |
| 50°        | 0,7660   | 0,6428   | 1,1918                | 0,8391                 |
| 55°        | 0,8122   | 0,5736   | 1,4282                | 0,7002                 |
| 60°        | 0,8660   | 0,5000   | 1,7320                | 0,5774                 |
| 65°        | 0,9063   | 0,4226   | 2,145                 | 0,4663                 |
| 70°        | 0,9397   | 0,3420   | 2,747                 | 0,3640                 |
| 75°        | 0,9659   | 0,2583   | 3,732                 | 0,2679                 |
| 80°        | 0,9848   | 0,1736   | 5,671                 | 0,1763                 |
| 85°        | 0,9962   | 0,0872   | 11,43                 | 0,0875                 |
| 90°        | 1,0000   | 0,0000   | $\infty$              | 0,0000                 |

### П. 3. Зависимость потерь холостого хода от номинальной мощности асинхронных двигателей

Таблица П.3

Потери холостого хода АД

| Частота вращения $\text{мин}^{-1}$ | $P_{\text{ном}}$ , кВт | $\Delta P_x\%$ |      |      |
|------------------------------------|------------------------|----------------|------|------|
|                                    |                        | A2             | A02  | 4A   |
| 3000                               | 0–10                   | 4,4            | 6,9  | 6,5  |
|                                    | 10–40                  | 3,4            | 5,9  | 5,4  |
|                                    | 40–125                 | 2,8            | 5,3  | 4,8  |
| 1500                               | 0–10                   | 4,8            | 5,2  | 3,9  |
|                                    | 10–40                  | 3,3            | 3,7  | 3,1  |
|                                    | 40–100                 | 2,3            | 2,7  | 2,3  |
| 1000                               | 0–10                   | 4,94           |      |      |
|                                    | 10–40                  | 3,04           | 2,7  | 2,4  |
|                                    | 40–75                  | 2,55           |      |      |
| 750                                | 0–10                   | 4,5            | 4,65 | 3,95 |
|                                    | 10–40                  | 2,4            | 3,05 | 2,45 |
|                                    | 40–50                  |                | 2,55 | 2,40 |

**П. 4. Выбор длины (в м) и диаметр (в мм) нихромовой проволоки  
электронагревательных элементов (U = 220 В)**

Таблица П4

Параметры нихромовой проволоки

| Мощность тока Р в кВт | Сила тока в А | Диаметр проволоки в мм | 0,4  |       | 0,5  |       | 0,6  |       | 0,7  |       | 0,8  |       | 0,9  |       |
|-----------------------|---------------|------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
|                       |               |                        | l, м | t, °C | l, м | t, °C | l, м | t, °C | l, м | t, °C | l, м | t, °C | l, м | t, °C |
| 0,175                 | 0,8           | 150                    | 31   | 110   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     |
| 0,23                  | 1,05          | 200                    | 23   | 155   | 28   | 105   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     |
| 0,29                  | 1,32          | 250                    | 18   | 210   | 22   | 130   | 42   | 110   | –    | –     | –    | –     | –    | –     |
| 0,35                  | 1,59          | 300                    | 14,8 | 270   | 18,4 | 170   | 35   | 140   | 48   | 150   | –    | –     | –    | –     |
| 0,4                   | 1,82          | 350                    | 12,3 | 340   | 15,6 | 230   | 29   | 170   | 41   | 130   | 53   | 110   | –    | –     |
| 0,46                  | 2,09          | 400                    | 10,5 | 420   | 13,6 | 270   | 25   | 200   | 35   | 150   | 47   | 125   | 57   | 100   |
| 0,52                  | 2,36          | 450                    | 9,1  | 500   | 11,8 | 320   | 22   | 230   | 31   | 170   | 41   | 145   | 50   | 120   |
| 0,58                  | 2,64          | 500                    | 8,1  | 620   | 10,2 | 370   | 19,7 | 270   | 28   | 200   | 37   | 165   | 45   | 135   |
| 0,7                   | 3,18          | 600                    | 6,6  | 700   | 8,5  | 490   | 16   | 350   | 23   | 260   | 30   | 210   | 38   | 170   |
| 0,81                  | 3,64          | 700                    | 5,7  | 810   | 7,1  | 590   | 13,3 | 400   | 19,5 | 320   | 26   | 260   | 32   | 210   |
| 0,93                  | 4,22          | 800                    | 5    | 910   | 6,1  | 700   | 11,5 | 510   | 16,8 | 390   | 22   | 310   | 27   | 260   |
| 1,04                  | 4,72          | 900                    | 4,3  | 1010  | 5,2  | 790   | 10,1 | 580   | 14,5 | 470   | 19,5 | 370   | 24   | 300   |
| 1,16                  | 5,26          | 1000                   | –    | –     | 4,6  | 860   | 9    | 660   | 13   | 540   | 17,5 | 420   | 22   | 340   |
| 1,39                  | 6,31          | 1200                   | –    | –     | 3,5  | 1000  | 7,2  | 810   | 10,7 | 580   | 14,2 | 530   | 17,6 | 440   |
| 1,62                  | 7,35          | 1400                   | –    | –     | –    | –     | 5,9  | 930   | 8,9  | 760   | 11,8 | 630   | 15   | 530   |
| 1,82                  | 8,40          | 1600                   | –    | –     | –    | –     | 5,4  | 1020  | 7,7  | 870   | 10,2 | 730   | 12,7 | 610   |
| 2,04                  | 9,28          | 1800                   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | 6,6  | 960   | 9    | 810   | 11,2 | 690   |
| 2,21                  | 10            | 2000                   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | 5,8  | 1050  | 8    | 900   | 10,2 | 770   |
| 2,55                  | 11,6          | 2200                   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | 7,1  | 970   | 8,9  | 830   |
| 2,78                  | 12,6          | 2400                   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | 6,4  | 1060  | 8,2  | 930   |
| 3                     | 13,6          | 2600                   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | 7,3  | 970   |
| 3,24                  | 14,7          | 2800                   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | 6,7  | 1040  |
| 3,47                  | 15,8          | 3000                   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     |
| 4,05                  | 18,4          | 3500                   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     |
| 4,64                  | 21,1          | 4000                   | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     | –    | –     |

**П. 5. Расчет параметров статических конденсаторов  
для разных схем подключения при напряжении  $U = 0,22-10$  кВ**

Таблица П.5

Параметры схем включения статических конденсаторов

| № П/П | Схема включения конденсаторов | Способ измерения емкости                    | C, мкф  | $Q_H$ , кВАр   | $I_H$ , А  | $U_H$ , кВ   | f, кГц  |
|-------|-------------------------------|---|---|--|--|--|---|
| 1     |                               | а) прибор Ф4318 (0,001–500 мкф)<br>б)<br>в) | $C_{б)} = \frac{0,16I_H}{fU_H}$<br>$C = \frac{0,16Q_H}{fU_H^2}$<br>$C = \frac{0,16}{fX_c}$<br>$C_{в)} = \frac{0,16}{fR_2 \operatorname{tg} \varphi}$<br>( $\cos \varphi = \frac{U_2}{U_1}$ )  | $Q_H = U_H I_H$<br>$Q_H = 6,28CU_H^2$<br>$Q_H = \frac{U_H^2}{X_c}$<br>$Q_H = I_H^2 X_c$  | $I_H = \frac{Q_H}{U_H}$<br>$I_H = 6,28CU_H$<br>$I_H = \frac{U_H}{X_c}$ | $U_H = I_H X_c$<br>$U_H = \frac{Q_H}{I_H}$<br>$U_H = \frac{0,16I_H}{cf}$<br>$U_H = \sqrt{\frac{0,16Q_H}{cf}}$                      | $f = \frac{0,16I_H}{CU_H}$<br>$f = \frac{0,16Q_H}{CU_H^2}$<br>$f = \frac{0,16}{CX_c}$ |
| 2     |                               | а)<br>б)                                    | $C_{\Delta а)} = \frac{2}{3}(C_{12} + C_{23} + C_{31})$<br>$C_{\Delta б)} = \frac{2}{C_1 + C_2 + C_3}$<br>$C_{\Delta а)} = \frac{0,27I_H}{fU_H}$<br>$C_{\Delta б)} = \frac{0,16Q_{\Delta}}{fU_H^2}$<br>$C_{12} = 0,5 C_{\Delta}$<br>$C_1 = 0,67 C_{\Delta}$ | $Q_{\Delta} = \sqrt{3}U_H I_H$<br>$Q_{\Delta} = 6,28fC_{\Delta}U$<br>$Q = P_1(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$ ,<br>где $\operatorname{tg} \varphi_1$ до компен.<br>$\operatorname{tg} \varphi_2$ после компен. | $I_H = \frac{Q_{\Delta}}{\sqrt{3}U_H}$<br>$I_H = 3,64fC_{\Delta}U_H$   | $U_H = \frac{Q_{\Delta}}{\sqrt{3}I_H}$<br>$U_H = \frac{0,27I_H}{C_{\Delta}f}$<br>$U_H = \sqrt{\frac{0,16Q_{\Delta}}{C_{\Delta}f}}$ | $f = \frac{0,27I_H}{C_{\Delta}U_H}$<br>$f = \frac{0,16Q_{\Delta}}{C_{\Delta}U_H^2}$   |
| 3     |                               | а)<br>б)                                    | $C_{\times а)} = 2(C_{12} + C_{23} + C_{31})$<br>$C_{\times б)} = \frac{3(C_1 + C_2 + C_3)}{2}$<br>$C_{\times а)} = \frac{0,81I_H}{fU_H}$<br>$C_{\times б)} = \frac{0,48Q_{\times}}{fU_H^2}$<br>$C_{12} = 0,16 C_{\times}$<br>$C_1 = 0,22 C_{\times}$       | $Q_{\times} = \sqrt{3}U_H I_H$<br>$Q_{\times} = 2,1fC_{\times}U_H^2$<br>$\frac{Q_{\Delta}}{Q_{\times}} = 3$  | $I_H = \frac{Q_{\times}}{\sqrt{3}U_H}$<br>$I_H = 1,21fC_{\times}U_H$   | $U_H = \frac{Q_{\times}}{\sqrt{3}I_H}$<br>$U_H = \frac{0,81I_H}{C_{\times}f}$<br>$U_H = \sqrt{\frac{0,48Q_{\times}}{C_{\times}f}}$ | $f = \frac{0,81I_H}{C_{\times}U_H}$<br>$f = \frac{0,48Q_{\times}}{C_{\times}U_H^2}$   |

Обозначения:

$U_H$  – линейное напряжение, кВ;

$I_H$  – номинальный линейный ток, А;

$Q_H$  – номинальная мощность, кВАр;

f – частота, кГц;

$R_2$  – внутреннее сопротивление вольтметра  $V_2$ , кОм;  
 $C_{\Delta}, C_{\times}$  – полные ёмкости всех трех фаз (паспортные значения), мкФ;  
 $C_{12}$  – измеренная ёмкость между выводами 1 и 2, аналогично  $C_{23}$  и  $C_{31}$ ;  
 $C_1$  – измеренная ёмкость между выводами 1 и 2 при замкнутых 2 и 3;  
 $C_2$  – между выводами 2 и 3 при замкнутых 1 и 3;  
 $C_3$  – между выводами 3 и 1 при замкнутых 1 и 2.

**Примечания:**

1. При способах измерения ёмкости б) и в) подводимое напряжение  $U = 100 \div 220$  В.

2. При измерении ёмкости высоковольтных конденсаторов ( $U = 1 \div 10$  кВ) в схему 1,6 включается миллиамперметр, а при его отсутствии измерения производятся двумя вольтметрами по схеме 1 в.

3. Ёмкость конденсаторов, соединенных в  $\Delta$  или  $\times$ , измеряют непосредственного Ф4318 или при помощи мостов переменного тока типов Р-525, Р-595, МД-16 или методом амперметра-вольтметра.

## II. 6. Параметры конденсаторов типа ЭСВ

Таблица II.6

Основные параметры конденсаторов ЭСВ

| Тип конденсатора | $Q_H$ ,<br>кВАр | $C_H$ ,<br>мкф | $I_H$ ,<br>А | $U_H$ ,<br>кВ | fkГц |
|------------------|-----------------|----------------|--------------|---------------|------|
| 1. ЭСВ-0,8-1     | 250             | 62,2           | 312          | 0,8           | I    |
| 2. ЭСВ-1-1       | 250             | 39,8           | 250          | I             | I    |
| 3. ЭСВ-0,8-2,4   | 300             | 31,2           | 375          | 0,8           | 2,4  |
| 4. ЭСВ-1-2,4     | 300             | 19,9           | 300          | I             | 2,4  |
| 5. ЭСВ-0,8-10    | 400             | 9,96           | 500          | 0,8           | 10   |

## II. 7. Электрические параметры тиристорных преобразователей частоты в номинальном режиме

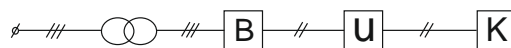


Таблица II.7

Основные параметры ТПЧ

|             |                        |                         |                |                                 |
|-------------|------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------|
| ТПЧ-800-1   | 920 кВА                | 915 кВА                 | $Pd = 825$ кВт | 1300 кВА                        |
|             | 852 кВт                | 850 кВт                 | $Ud = 0,5$ кВ  | 800 кВт                         |
|             | 6 кВ                   | 0,4 кВ                  | $Id = 1650$ А  | 800 В ( $\cos \varphi = 0,65$ ) |
|             | 90 А                   | 1350 А                  |                | 1600 А                          |
|             | 0,9 ( $\cos \varphi$ ) | 0,92 ( $\cos \varphi$ ) |                |                                 |
| ТПЧ-250-2,4 | 310 кВА                | 305 кВА                 | $Pd = 265$ кВт | 425 кВА                         |
|             | 280 кВт                | 278 кВт                 | $Ud = 0,5$ кВ  | 250 кВт                         |
|             | 6 кВ                   | 0,4 кВ                  | $Id = 530$ А   | 800 В ( $\cos \varphi = 0,58$ ) |
|             | 31 А                   | 470 А                   |                | 530 А                           |
|             | 0,38                   | 0,9                     |                |                                 |

*Учебное издание*

**Ганджа Сергей Анатольевич,  
Лебедев Геннадий Григорьевич**

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.  
ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ИНЖЕНЕРА-ЭЛЕКТРИКА**

*Учебное пособие*

*Редактор С.И. Уварова  
Техн. редактор А.В. Миних  
Компьютерная верстка Е.В. Федоровой  
Дизайн обложки Н.А. Аюповой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 18.04.2017. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 15,34. Тираж 100 экз. Заказ 129/264.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.