Содержание

Список участников 17
Введение 19
Предисловие 21
Глава 1. ОБЗОР СТАНДАРТОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
Франко Буа и Анджело Баггини 23
1.1. Стандартизация 26
1.1.1. Стандарты ISO 27
1.1.1.1. Стандарт ISO 50001 27
1.1.1.2. Совместный проектный комитет 2 ISO/IEC (англ. ISO/IEC JPC 2) 28
1.1.2. Международная электротехническая комиссия (англ. IEC) 28
1.1.2.1. Исследовательская группа № 1 «Энергетическая эффективность и возобновляемые источники энергии» 29
1.1.2.2. Исследовательская группа № 3 «Интеллектуальные электрические сети» 29
1.1.2.3. Исследовательская группа № 4. «Сети электрические распределительные низковольтные напряжением до 1500 В постоянного тока» 30
1.1.3. Европейский комитет по стандартизации (фр. Comité Européen de Normalisation, CEN) и Европейский комитет электротехнической стандартизации (фр. Comité Européen de Normalisation Électrotechnique) 30
1.1.3.1. Консультационный комитет по вопросам энергетического менеджмента (англ. Sector Forum Energy Management, SFEM) 32
Дополнительные материалы 32
Глава 2. КАБЕЛИ И ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ
Паола Пеццини и Андреас Сампер 33
2.1. Теория теплопередачи 34
2.1.1. Теплопроводность 34
2.1.2. Конвекция 34
2.1.3. Излучение 35
2.2. Номинальный ток кабелей воздушной прокладки 36
2.3. Экономические аспекты 40
2.4. Расчет номинального тока: суммарные затраты 41
2.4.1. Определение CJ 41
2.5. Определение экономически оптимального сечения проводника 43
2.5.1. Диапазон экономически оптимальных токов для каждого проводника в линейке сечений 43
2.5.2. Экономически оптимальное сечение проводника для заданной нагрузки 43
2.6. Выводы 44
Список литературы 44

Глава 3. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ
Роман Таргос, Штефан Фассбиндер и Анджело Баггини 46

3.1. Потери в трансформаторах. 49
3.1.1. Потери холостого хода. 49
3.1.2. Нагрузочные потери 50
3.1.3. Потери во вспомогательном оборудовании. 50
3.1.4. Дополнительные потери вследствие наличия высших гармоник, несимметрии и реактивной мощности. 51
3.1.4.1. Высшие гармоники 52
3.1.4.2. Искажение синусоидального тока. 52
3.1.4.3. Искажение напряжения 54
3.1.4.4. Снижение дополнительных гармонических потерь. 56
3.1.4.5. Несимметрия. 56
3.2. Коэффициент полезного действия и коэффициент нагрузки 57
3.3. Потери и система охлаждения 59
3.4. Стандарты и нормативы энергоэффективности. 60
3.4.1. Стандарты MEPS 65
3.4.2. Обязательная маркировка 66
3.4.3. Добровольные программы 66
3.5. Определение затрат за весь срок службы 70
3.5.1. Затраты за весь срок службы трансформатора 70
3.5.2. Детальное рассмотрение. 74
3.6. Разработка, материалы и изготовление 78
3.6.1. Сердечник 79
3.6.1.1. Холоднокатаная текстурированная сталь с направленной кристаллизацией и сталь с высокой магнитной проницаемостью (HiB). 80
3.6.1.2. Аморфная сталь 83
3.6.2. Обмотки. 84
3.6.2.1. Сверхпроводимость (высокотемпературная, ВТСП). 85
3.6.3. Другие разработки 87
3.6.3.1. Трансформаторы с газовой изоляцией. 87
3.7. Ситуационный анализ: оценка общих эксплуатационных расходов (TOC) промышленного трансформатора 88
3.7.1. Методика. 89
3.7.2. Результаты 91
Справочная литература. 93
Дополнительные материалы 93
3.A. Приложение 94
3.A.1. Некоторые стандарты MEPS 94
3.A.1.1. Австралия. 94
3.A.1.2. США. 95
3.A.1.3. Европа 98
3.A.1.3.1. Европейский стандарт EN 50464-1, с жидким наполнением. 98
3.A.1.3.2. Европейский стандарт EN 50541-1, сухой тип 100
3.A.1.3.3. Проекты европейских стандартов MEPS. 101
3.A.1.4. Формулы для оценки потерь — американские и европейские. 102

Глава 4. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЗДАНИЯМИ
Анджело Баггини и Анналиса Марра 105

4.1. Функции автоматизации для экономии энергии 106
4.1.1. Контроль температуры 107
4.1.2. Освещение 108
4.1.3. Приводы и двигатели 109
4.1.4. Технические предупредительные сигналы и управление 110
4.1.5. Дистанционное управление 110
4.2. Системы автоматизации 110
4.2.1. Системы KNX 112
4.2.1.1. Архитектура 112
4.2.1.2. Среда передачи 115
4.2.1.3. Питающая линия 115
4.2.1.4. Радиоволны 115
4.2.1.5. Протокол Ethernet 116
4.2.1.6. Конфигурация 116
4.2.2. Системы SCADA 117
4.2.2.1. Человеко-машинный интерфейс 119
4.2.2.2. Дистанционный терминал (RTU) 120
4.2.2.3. Управляющая станция 121
4.2.2.4. Коммуникационная инфраструктура и методы 121
4.3. Собственное энергопотребление устройств автоматизации 122
4.4. Основные схемы 123
4.4.1. Отопление и охлаждение 123
4.4.1.1. Автоматическое управление каждым помещением в отдельности посредством термостатически регулируемых клапанов или электронного регулятора 123
4.4.1.2. Регулировка температуры воды с коррекцией температуры подачи в зависимости от температуры наружного воздуха 124
4.4.1.3. Управление включением/выключением распределительного насоса 125
4.4.1.4. Функция автоматического управления с программой установленной продолжительности 126
4.4.1.5. Частичная блокировка (в зависимости от системы ОВК) 127
4.4.1.6. Функция автоматического управления любым помещением с коммуникацией между регуляторами и системной шиной 128
4.4.1.7. Регулировка внутренней температуры 128
4.4.1.8. Управление распределительными насосами с частотно-регулируемым приводом при постоянной величине ΔP 129
4.4.1.9. Автоматическое управление с оптимизированным запуском/остановом 130
4.4.1.10. Функция интегрированного управления всеми помещениями посредством обработки запросов (например, о наличии людей, качестве воздуха и т.п.) 131
4.4.1.11. Функция полной блокировки 132
4.4.2. Вентиляция и кондиционирование воздуха 132
4.4.2.1. Управление по времени 132

4.4.2.2. Управление включением/отключением по времени 133
4.4.2.3. Управление процессом оттаивания в рекуператоре тепла ... 134
4.4.2.4. Функция управления процедурой рекуперации 135
4.4.2.5. Ночное охлаждение 136
4.4.2.6. Управление с постоянным заданным значением 137
4.4.2.7. Ограничение влажности в потоке воздуха 138
4.4.2.8. Автоматический контроль давления или расхода 139
4.4.2.9. Естественное охлаждение 140
4.4.2.10. Регулирование заданной температуры в зависимости от температуры окружающей среды 141
4.4.2.11. Функция регулировки влажности потока воздуха 142
4.4.2.12. Функция управления с учетом присутствия 143
4.4.2.13. Функция управления с заданным значением в зависимости от нагрузки 144
4.4.3. Освещение 145
4.4.3.1. Функция ручного включения и автоматического отключения 145
4.4.3.2. Функция ручного управления питанием и автоматическое включение/уменьшение/ отключение с учетом присутствия 146
4.4.3.3. Моторизованное управление с автоматическим контролем электроприводов солнцезащитных жалюзи 146
4.4.3.4. Автоматическая функция управления дневным освещением 147
4.4.4. Солнцезащитные жалюзи 148
4.4.4.1. Функция комбинированного управления освещением/жалюзи/системой ОВК 148
4.4.5. Управление производственными зданиями 149
4.4.5.1. Функция централизованного управления 149
4.4.6. Технические установки в здании 150
4.4.6.1. Функция обнаружения неисправностей, диагностики и обеспечения технической поддержки 150
4.4.6.2. Функция формирования отчета об энергопотреблении, внутренних условиях и возможностях для улучшения 151
4.5. Оценка энергетической эффективности здания 152
4.5.1. Европейский стандарт EN 15232 152
4.5.1.1. Классы автоматизации с точки зрения энергоэффективности 153
4.5.1.2. Определение классов автоматизации 154
4.5.2. Сравнение методов: подробные расчеты и факторы BAC 155
4.5.2.1. Подробный расчет 160

5. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЕГО ПОКАЗАТЕЛИ
Андрей Цикер, Збигнев Ханзелка и Ирена Васяк 167

5.1. Действующее значение напряжения 168
5.1.1. Источники 170
5.1.2. Влияние на энергоэффективность 170
5.1.2.1. Системы освещения 170
5.1.2.2. Электродвигатели 171
5.1.2.3. Электрические печи 171
5.1.2.4. Другие потребители 172
5.1.2.5. Затраты 172

5.1.3. Методы предупреждения возможных последствий 173
5.1.3.1. Регулирование напряжения путем введения добавочного напряжения 173
5.1.3.2. Регулирование напряжения путем изменения потока реактивной мощности 174
5.1.3.3. Управление напряжением путем изменения полного сопротивления сети 174
5.2. Колебания напряжения 175
5.2.1. Описание возмущений 176
5.2.2. Источники колебаний напряжения 177
5.2.3. Воздействие и затраты 180
5.2.3.1. Источники освещения 180
5.2.3.2. Электрические машины 181
5.2.3.3. Статические преобразователи 181
5.2.3.4. Электролизеры и электротермическое оборудование 181
5.2.4. Методы предупреждения возможных последствий 181
5.3. Несимметрия тока и напряжения 182
5.3.1. Описание возмущений 182
5.3.2. Источники 184
5.3.3. Воздействие и затраты 184
5.3.3.1. Система электроснабжения 184
5.3.3.2. Асинхронные двигатели 186
5.3.3.3. Синхронные генераторы 186
5.3.3.4. Статические преобразователи 187
5.3.3.5. Прочие нагрузки 187
5.3.4. Методы предупреждения возможных последствий 187
5.3.4.1. Принцип симметрирования 188
5.4. Искажение напряжения и тока 189
5.4.1. Описание возмущений 189
5.4.2. Источники 191
5.4.3. Воздействие и затраты 194
5.4.3.1. Снижение энергоэффективности энергосистем 195
5.4.3.2. Поверхностный эффект 195
5.4.3.3. Перенапряжения в электросетях 196
5.4.3.4. Увеличение потенциала нейтрали при подключении по схеме «звезда» 196
5.4.3.5. Перегрузка цепи нейтрали трехфазных сетей 196
5.4.3.6. Воздействие на трехфазные трансформаторы 196
5.4.3.7. Воздействие на работу вращающихся машин 197
5.4.3.8. Воздействие несинусоидальных периодических колебаний на электронное оборудование 198
5.4.3.9. Воздействие на батареи конденсаторов 198
5.4.3.10. Экономический ущерб 199
5.4.4. Методы предупреждения возможных последствий 199
5.4.4.1. Пассивные фильтры 201
5.4.4.2. Активный фильтр 202
5.4.4.3. Гибридные фильтры 203
Список литературы 209
Дополнительные материалы 210

Глава 6. ЛОКАЛЬНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ И МИКРОСЕТИ

Ирена Васиак и Збигнев Ханзелка 211

6.1. Технологии распределенных энергетических ресурсов 212
6.1.1. Источники энергии 213
6.1.1.1. Когенерация 215
6.1.2. Аккумулирование энергии 217
6.2. Влияние РГ на потери мощности в распределительных сетях 224
6.3. Микросети 227
6.3.1. Концепция 227
6.3.2. Области применения систем накопления энергии 229
6.3.2.1. Интеграция возобновляемых источников энергии 229
6.3.2.2. Балансирование нагрузки 230
6.3.2.3. Системные услуги 230
6.3.2.4. Ограничение пиковой нагрузки 231
6.3.3. Управление и контроль 231
6.3.4. Качество электроэнергии и надежность в микросетях 234
Список литературы 236
Дополнительные материалы 238

Глава 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ
Джорис Лемменс и Вим Депрез 239

7.1. Потери в электродвигателях 241
7.1.1. Энергетический баланс и энергоэффективность 242
7.1.2. Классификация составляющих потерь 244
7.1.3. Факторы влияния 246
7.1.3.1. Температурные эффекты 247
7.1.3.2. Частичная нагрузка 248
7.1.3.3. Техническое обслуживание 249
7.1.3.4. Отклонение параметров электроснабжения 249
7.1.3.5. Работа от преобразователя, качество электроэнергии и система электроснабжения 250
7.1.3.6. Механическая передача 250
7.2. Стандарты эффективности двигателей 251
7.2.1. Классификация стандартов эффективности 251
7.2.2. Стандарты измерения эффективности 253
7.2.2.1. Общий порядок и особенности проведения испытаний 254
7.2.2.2. Различия между стандартами измерений 256
7.2.3. Будущий стандарт для приводов с переменной скоростью 261
7.3. Высокоэффективные технологии электродвигателей 263
7.3.1. Материалы, применяемые в двигателях 265
7.3.1.1. Материал сердечника 265
7.3.1.2. Материал проводника ротора 271
7.3.1.3. Постоянные магниты 274
7.3.2. Конструкция двигателя 276
7.3.2.1. Оптимизация геометрии статора, ротора и воздушного зазора 276
7.3.2.2. Схема обмотки статора 278
7.3.2.3. Охлаждение и тепловой расчет 279
7.3.2.4. Подшипники 280

7.3.2.5. Альтернативные технологии двигателей 280
7.3.3. Производство двигателей 283
7.3.3.1. Производство сердечника 283
7.3.3.2. Обмотка статора 284
7.3.3.3. Отливка короткозамкнутой обмотки ротора 284
7.3.3.4. Геометрические допуски 285
Список литературы 285

Глава 8. ОСВЕЩЕНИЕ
Мирцея Чиндрис и Антони Судриа-Андрею 288

8.1. Энергия и системы освещения 289
8.1.1. Потребление энергии в осветительных системах 289
8.1.2. Энергетическая эффективность систем освещения 290
8.2. Нормирование 293
8.3. Технологические преимущества в области систем освещения 294
8.3.1. Эффективные источники освещения 294
8.3.2. Энергосберегающая пускорегулирующая аппаратура 301
8.3.3. Энергосберегающие светильники 303
8.4. Энергосбережение в системах внутреннего освещения 304
8.4.1. Политические усилия, направленные на поддержку повышения энергоэффективности 304
8.4.2. Модернизация или переоборудование? 308
8.4.2.1. Переоборудование 308
8.4.2.2. Модернизация 309
8.4.3. Управление освещением 311
8.4.3.1. Ручное управление 312
8.4.3.2. Автоматическое управление 312
8.4.4. Естественное освещение 316
8.5. Энергосбережение в системах наружного освещения 318
8.5.1. Энергосберегающие лампы и светильники 318
8.5.2. Управление наружным освещением 321
8.5.2.1. Регулирование яркости газоразрядных ламп высокой интенсивности 322
8.5.2.2. Регулирование яркости светодиодов 324
8.5.2.3. Цифровые системы управления освещением 324
8.6. Обслуживание систем освещения 326
Список литературы 327
Дополнительные материалы 329

Глава 9. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
Даниэль Монтезинос-Миракл, Джоан Бергас-Жанье и Эдрис Пурезмаэль 330

9.1. Методы управления асинхронными электродвигателями и двигателями с постоянными магнитами 334
9.1.1. Управление напряжением/частотой (*V/f*) 334
9.1.1.1. Насосы, вентиляторы и системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха 337
9.1.2. Векторное управление 339
9.1.3. Прямое регулирование крутящего момента (DTC) 341
9.2. Методы управления с энергетической оптимизацией 343

9.2.1. Потери в преобразователе ... 345
9.2.2. Потери в двигателе ... 345
9.2.3. Стратегии управления с энергетической оптимизацией ... 346
9.3. Топология частотно-регулируемого привода ... 346
9.3.1. Входной каскад ... 347
9.3.2. Шина постоянного тока ... 348
9.3.3. Инвертор ... 350
9.4. Новые тенденции в силовых полупроводниковых устройствах ... 351
9.4.1. Методы модуляции ... 352
9.4.2. Обзор различных методов модуляции ... 354
9.4.2.1. Прямоугольная модуляция ... 354
9.4.2.2. Синусоидальная ШИМ ... 356
9.4.2.3. ШИМ с введением третьей гармоники ... 357
9.4.2.4. Пространственно-векторная ШИМ ... 358
9.4.2.5. Топологии многоуровневых инверторов ... 358
Список литературы ... 364
Дополнительные материалы ... 365

Глава 10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАГРЕВА
Мирцея Чиндрис и Андреас Сампер ... 366

10.1. Общие аспекты электронагрева в промышленности ... 370
10.2. Основные технологии электронагрева ... 374
10.2.1. Резистивный нагрев ... 374
10.2.1.1. Косвенный резистивный нагрев ... 375
10.2.1.2. Непосредственный резистивный нагрев ... 379
10.2.2. Инфракрасный нагрев ... 382
10.2.2.1. Принцип ... 382
10.2.2.2. Типы систем и области применения ... 383
10.2.2.3. Преимущества и ограничения ... 385
10.2.2.4. Стандартные показатели эффективности ... 385
10.2.2.5. Рекомендации по применению ... 386
10.2.3. Индукционный нагрев ... 387
10.2.4. Диэлектрический нагрев ... 391
10.2.4.1. Радиочастотный нагрев ... 393
10.2.4.2. Микроволновый нагрев ... 396
10.2.4.3. Сравнение радиочастотного и микроволнового нагревов ... 398
10.2.5. Дуговые печи ... 399
10.3. Особенности повышения энергоэффективности в промышленных процессах термической обработки ... 401
10.3.1. Замена традиционных технологий нагрева ... 401
10.3.1.1. Резистивный и инфракрасный нагрев ... 401
10.3.1.2. Диэлектрический нагрев ... 402
10.3.2. Выбор наиболее подходящей электротехнологии ... 404
10.3.3. Повышение эффективности существующего электронагревательного оборудования ... 404

10.3.3.1. Резистивный нагрев . . . 405
10.3.3.2. Инфракрасный нагрев . . . 405
10.3.3.3. Индукционный нагрев . . . 406
10.3.3.4. Диэлектрический нагрев . . . 407
10.3.3.5. Дуговые печи . . . 408
Список литературы . . . 408
Дополнительные материалы . . . 409

Глава 11. СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА (ОВК)
Роберто Виллафафила-Роблес и Жауме Салом . . . 410

11.1. Основные понятия . . . 411
11.2. Тепловой комфорт среды . . . 413
11.3. Системы ОВК . . . 418
11.3.1. Преобразование энергии . . . 421
11.3.2. Энергетический баланс . . . 423
11.3.3. Энергетическая эффективность . . . 424
11.4. Мероприятия по повышению энергоэффективности систем ОВК . . . 425
11.4.1. Конечное потребление . . . 425
11.4.2. Пассивные методы . . . 426
11.4.2.1. Локальные климатические условия . . . 426
11.4.2.2. Планирование местоположения . . . 426
11.4.2.3. Ориентация . . . 426
11.4.2.4. План здания . . . 427
11.4.2.5. Наружная оболочка . . . 427
11.4.2.6. Защита от солнца . . . 428
11.4.2.7. Естественная вентиляция . . . 428
11.4.3. Устройство преобразования . . . 429
11.4.4. Источники энергии . . . 431
Список литературы . . . 432
Дополнительные материалы . . . 433

Глава 12. ЦЕНТРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
Анджело Баггини и Франко Буа . . . 434

12.1. Стандарты . . . 434
12.2. Динамика потребления . . . 436
12.2.1. Индекс энергетической эффективности . . . 437
12.3. IT-инфраструктура и оборудование . . . 438
12.3.1. Блейд-сервер . . . 438
12.3.2. Накопители (хранилища) данных . . . 439
12.3.3. Сетевое оборудование . . . 439
12.3.4. Консолидация . . . 440
12.3.5. Виртуализация . . . 440
12.3.6. Программное обеспечение . . . 441
12.4. Инфраструктура объекта . . . 441
12.4.1. Электрическая инфраструктура . . . 441
12.4.1.1. ИБП (источник бесперебойного питания) . . . 442

12.4.1.2. Распределительный щит питания 443
12.4.1.3. БП (блок питания) 443
12.4.1.4. Освещение 444
12.4.2. Инфраструктура системы вентиляции и кондиционирования 444
12.4.2.1. Методические рекомендации по организации охлаждения 445
12.5. Источники распределенной генерации и комбинированной выработки для центров обработки данных 448
12.6. Организация обеспечения энергоэффективности 449
Дополнительные материалы 450

Глава 13. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
Збигнев Ханзелка, Вальдемар Шпира, Андрей Цикер и Кшиштоф Пьятек 451

13.1. Компенсация реактивной мощности в электрической сети 453
13.1.1. Экономическая эффективность компенсации реактивной мощности 458
13.2. Компенсация реактивной мощности в промышленной электрической сети 461
13.2.1. Линейные нагрузки 463
13.2.1.1. Пример 1. Централизованная компенсация 464
13.2.2. Групповая компенсация 464
13.2.2.1. Пример 2. Групповая компенсация 465
13.2.3. Нелинейные нагрузки 469
13.2.3.1. Пример 3. Компенсация реактивной мощности при наличии нелинейных нагрузок 472
13.3. Компенсация реактивной мощности 475
13.3.1. Синхронный компенсатор 475
13.3.2. Батареи конденсаторов 476
13.3.3. Силовые электронные компенсаторы/стабилизаторы 477
13.3.3.1. Конденсаторы с тиристорным управлением (TSC) 477
13.3.3.2. Реакторы с нерегулируемыми конденсаторами с тиристорным управлением (FC/TCR) 477
13.3.3.3. Статические компенсаторы (STATCOM) 480
Список литературы 483
Дополнительные материалы 483

Алфавитный указатель 484