



Уважаемые читатели!

Перед вами издание из серии «Мир энергетики». В нее вошли работы ученых с мировым именем, ранее не издававшиеся на русском языке. Книги отобраны членами Технического комитета Российского национального комитета СИГРЭ и посвящены наиболее актуальным темам развития электрических сетей. Отрасль в России и во всем мире переживает период активной технологической трансформации. Именно поэтому серия «Мир энергетики» будет интересна как действующим специалистам, так и будущим энергетикам.

*Первый заместитель генерального директора –
исполнительный директор ПАО «Россети»,
Председатель Российского национального комитета СИГРЭ
А.Е. Муров*



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР ЭНЕРГЕТИКИ»

Муров Андрей Евгеньевич первый заместитель генерального директора – исполнительный директор ПАО «Россети», Председатель Российского национального комитета СИГРЭ

Председатель Технического комитета РНК СИГРЭ

Шаров Юрий Владимирович генеральный директор, ООО «Интер РАО – Инжиниринг»

Заместитель председателя Технического комитета РНК СИГРЭ

Шунтов Андрей Вячеславович (С4, «Технические характеристики энергосистем»), заместитель заведующего кафедрой электроэнергетических систем НИУ МЭИ

Члены Технического комитета РНК СИГРЭ:

Ануфриев Андрей Сергеевич (А2, «Трансформаторы»), главный инженер по инновациям и стандартизации, ООО «Тольяттинский трансформатор»

Баркин Олег Геннадьевич (С5, «Рынки электроэнергии и регулирование»), член правления – заместитель председателя правления ассоциации «НП Совет рынка»

Беляков Виктор Владимирович (А1, «Вращающиеся машины»), директор по развитию газовой генерации ООО «Интер РАО – Инжиниринг»

Водеников Дмитрий Александрович (В3, «Подстанции»), заместитель председателя правления – главный инженер, ПАО «ФСК ЕЭС»

Демченко Денис Александрович (С3, «Экологические характеристики работы энергосистем»), руководитель управления реализации инжиниринговых проектов ООО «Интер РАО – Инжиниринг»

Динмухаметов Фаниль Фаритович (В1, «Изолированные кабели»), исполнительный директор ООО «Таткабель»

Дьячков Владимир Анатольевич (С2, «Функционирование и управление энергосистем»), заместитель главного диспетчера по режимам АО «СО ЕЭС»

Елифанов Андрей Михайлович (А3, «Высоковольтное оборудование»), генеральный директор АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Жуков Андрей Васильевич (В5, «Релейная защита и автоматика»), заместитель директора по управлению режимами ЕЭС АО «СО ЕЭС»

Илюшин Павел Владимирович (С6, «Системы распределения электроэнергии и распределенная генерация»), проректор по научной работе Петербургского энергетического института повышения квалификации Минэнерго России

Ляпунов Евгений Викторович, генеральный директор ПАО «ФСК ЕЭС» – «МЭС Западной Сибири»

Осинцев Кирилл Анатольевич (ученый секретарь Технического комитета РНК СИГРЭ), начальник управления международных проектов ПАО «Российские сети»

Синенко Ольга Викторовна (D2, «Информационные системы и телекоммуникации»), генеральный директор АО «РТСофт»

Славинский Александр Зиновьевич (D1, «Материалы и разработка новых методов испытаний и средств диагностики»), председатель совета директоров ООО «Масса»

Сулов Константин Витальевич (С1, «Планирование развития энергосистем и экономика»), профессор кафедры электроснабжения и электротехники ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Сулова Ольга Владимировна (В4, «Электропередача постоянным током высокого напряжения»), ведущий научный сотрудник АО «НТЦ ЕЭС»

Архипов Игорь Леонидович, начальник Департамента инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС»

Новиков Сергей Васильевич, заместитель генерального директора АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», к.т.н.



Уважаемые читатели!

В современном мире вопрос повышения энергоэффективности актуален для всех крупных энергетических и промышленных компаний. «Россети» ведут многолетнюю системную работу в этом направлении. Проекты дают ощутимый экономический результат, что способствует выполнению нашей первоочередной задачи – обеспечению надежной работы объектов сетевой инфраструктуры.

В книге обобщен передовой опыт и представлен обзор технологических решений, применимых по всей цепочке электроснабжения. Например, читатель может ознакомиться с наработками по компенсации реактивной мощности, передаче и трансформации электроэнергии с применением современных материалов и технологий. Также рассмотрены вопросы управления двигательной нагрузкой с использованием силовой электроники, что наиболее востребовано промышленными предприятиями.

Кроме того, в издании раскрываются внешние факторы, влияющие на решение задач энергосбережения, разобраны подходы к проектированию и строительству центров хранения и обработки данных, организации систем вентиляции и кондиционирования воздуха, управлению освещением.

Уверен, что собранная информация окажется полезной для успешной реализации политики повышения энергетической эффективности как в самой отрасли, так и в энергоемких секторах промышленности.

*Первый заместитель генерального директора –
главный инженер ПАО «Россети»
А.В. Майоров*



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР



М И Р Э Н Е Р Г Е Т И К И

Андреас Сампер, Анджело Баггини

Эффективность использования электроэнергии: технологии и сферы применения

перевод с английского под общей редакции
Первого заместителя Генерального директора
ПАО «Россети» – главного инженера А.В. Майорова
с участием СРО Ассоциация «ЭнергоПрофАудит»

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2020



Издание осуществлено при поддержке
ПАО «Россети» и РНК СИГРЭ

УДК 621.332
ББК 31.27
С17

С17 Сампер Андреас, Баггини Анджело
Эффективность использования электроэнергии:
технологии и сферы применения
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 488 с. ISBN 978-5-94836-574-9

Новаторский подход этой книги заключается в том, чтобы доступно ознакомить читателя с технологиями, позволяющими повысить уровень эффективности использования электроэнергии, и сферами применения таких технологий. Из этой всеобъемлющей книги читатель узнает о различных методах энергосбережения, а также экспертное мнение по поводу большинства промышленных и коммерческих сфер электроэнергетики. В каждой главе рассматриваются различные мероприятия, направленные на достижение энергоэффективности, в широком диапазоне их сфер применения.

© 2012 John Wiley & Sons, Ltd

Все права защищены.

Авторизованный перевод оригинального издания

«Джон Вайли энд Санс Лимитед».

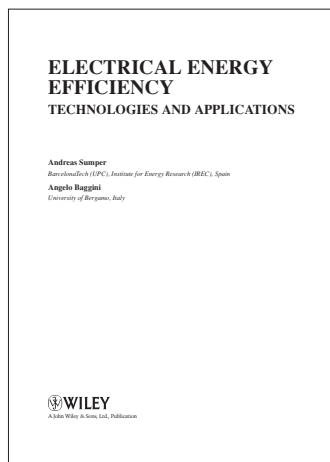
Ответственность за точность перевода лежит

на АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»,

а не «Джон Вайли энд Санс Лимитед».

Ни один фрагмент этой книги не может воспроизводиться без письменного разрешения оригинального правообладателя,

«Джон Вайли энд Санс Лимитед».



УДК 621.332
ББК 31.27

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление, 2020

Издательство благодарит СРО Ассоциация «ЭнергоПрофАудит» за помощь в научном редактировании перевода

ISBN 978-5-94836-574-9
ISBN 978-0-470-97551-0 (англ.)

Содержание

Список участников	17
Введение	19
Предисловие	21
Глава 1. ОБЗОР СТАНДАРТОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ	
<i>Франко Буа и Анджело Баггини</i>	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
<i>Дополнительные материалы</i>	32
Глава 2. КАБЕЛИ И ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ	
<i>Паола Пецини и Андреас Сампер</i>	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
<i>Список литературы</i>	44

Глава 3. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

<i>Роман Таргос, Штефан Фассбиндер и Анджело Баггини</i>	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 (ТОС) промышленного трансформатора	88
3.7.1. Методика	89
3.7.2. Результаты	91
<i>Справочная литература</i>	93
<i>Дополнительные материалы</i>	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**

<i>Анджело Баггини и Анналиса Марра</i>	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 ВАС	155
4.5.2.1.	Подробный расчет	160
Глава 5.	КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЕГО ПОКАЗАТЕЛИ <i>Андрей Цикер, Збигнев Ханзелка и Ирена Васяк</i>	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
<i>Список литературы</i>	<i>209</i>
<i>Дополнительные материалы</i>	<i>210</i>

<i>Ирена Васиак и Збигнев Ханзелка</i>	211
6.1. Технологии распределенных энергетических ресурсов	212
6.1.1. Источники энергии	213
6.1.1.1. Когенерация	215
6.1.2. Аккумуляирование 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
<i>Список литературы</i>	236
<i>Дополнительные материалы</i>	238
Глава 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ	
<i>Джорис Лемменс и Вим Депрез</i>	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
<i>Список литературы</i>	285
Глава 8. ОСВЕЩЕНИЕ	
<i>Мицея Чиндрис и Антони Судриа-Андреу</i>	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
<i>Список литературы</i>	327
<i>Дополнительные материалы</i>	329
Глава 9. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	
<i>Даниэль Монтезинос-Миракл, Джоан Бергас-Жанье и Эдрис Пурезмаэль</i>	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
<i>Список литературы</i>	364
<i>Дополнительные материалы</i>	365
Глава 10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАГРЕВА	
<i>Мицея Чиндрис и Андреас Сампер</i>	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
<i>Список литературы</i>	408
<i>Дополнительные материалы</i>	409
Глава 11. СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА (ОВК)	
<i>Роберто Виллаффила-Роблес и Жауме Салом</i>	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
<i>Список литературы</i>	432
<i>Дополнительные материалы</i>	433
Глава 12. ЦЕНТРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ	
<i>Анджело Баггини и Франко Буа</i>	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
<i>Дополнительные материалы</i>	450
Глава 13. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ <i>Збигнев Ханзелка, Вальдемар Шпира, Андрей Цикер и Кишиштоф Пьятек</i>	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
<i>Список литературы</i>	483
<i>Дополнительные материалы</i>	483
Алфавитный указатель	484

Список участников

Angelo Baggini
Industrial Engineering Department
University of Bergamo
Via Marconi 5 24044 Dalmine BG, Italy

Joan Bergas-Jané
Centre d'Innovació Tecnològica
en Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial de Barcelona
Av. Diagonal, 647. Planta 2 08028
Barcelona, Spain

Franco Bua
ECD Engineering Consulting and Design
Vai Maffi 21
27100 Pavia, Italy

Mircea Chindris
Electrical Power Systems Dept.
Technical University of Cluj-Napoca
15, C. Daicoviciu st.
400020 Cluj-Napoca, Romania

Andrei Czicker
Electrical Power Systems Dept.
Technical University of Cluj-Napoca
15, C. Daicoviciu st.
400020 Cluj-Napoca, Romania

Wim Deprez
Dept. Electrical Engineering ESAT
Av. Diagonal, 647. Planta 2 08028
Barcelona, Spain

Paola Pezzini
Centre d'Innovació Tecnològica
en Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya
(UPC)
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial de Barcelona
Av. Diagonal, 647. Planta 2 08028
Barcelona, Spain

K.U. Leuven, Research group ELECTA
Kasteelpark Arenberg 10
3001 Heverlee, Belgium

Stefan Fassbinder
Berantwort elektrotechnische Anwend-
ungen
Deutsches Kupferinstitut
Am Bonnheshof 5
D-40474 Dusseldorf, Germany

Zbigniew Hanzelka
University of Science and Technology —
AGH
30-059 Cracow, Al. Mickiewicza 30
Poland

Joris Lemmens
Dept. Electrical Engineering ESAT
K.U. Leuven, Research group ELECTA
Kasteelpark Arenberg 10
3001 Heverlee, Belgium

Annalisa Marra
ECD Engineering Consulting and Design
Vai Maffi 21
27100 Pavia, Italy

Daniel Montesinos-Miracle
Centre d'Innovació Tecnològica en Con-
vertidors Estàtics i Accionaments (CIT-
CEA)
Universitat Politècnica de Catalunya
(UPC)
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial de Barcelona

Andreas Sumper
Centre d'Innovació Tecnològica en
Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya
(UPC)
Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica
Industrial de Barcelona
Carrer Comte d'Urgell, 187 — 08036
Barcelona, Spain

Krzysztof Piątek
University of Science and Technology —
AGH
30-059 Cracow, Al. Mickiewicza 30,
Poland

Edris Pouresmaeil
Centre d'Innovació Tecnològica
en Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya
(UPC)
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial de Barcelona
Av. Diagonal, 647. Planta 2 08028
Barcelona, Spain

Jaume Salom
Institut de Recerca en Energia
de Catalunya (IREC)
Jardins de les Dones de Negre 1, 2^a pl.
08930 Sant Adrià de Besòs, Spain

Antoni Sudrià-Andreu
Centre d'Innovació Tecnològica
en Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya
(UPC)
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial de Barcelona
Av. Diagonal, 647. Planta 2 08028
Barcelona, Spain

and

Institut de Recerca en Energia de Catalu-
nya (IREC)
Jardins de les Dones de Negre 1, 2^a pl.
08930 Sant Adrià de Besòs, Spain

Waldemar Szpyra
University of Science and Technology —
AGH
30-059 Cracow, Al. Mickiewicza 30,
Poland

Roman Targosz
Polish Copper Promotional Centre
Plac Jana Pawła II 1-2
50-136 Wrocław, Poland

Roberto Villafáfila-Robles
Centre d'Innovació Tecnològica en Con-
vertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica
Industrial de Barcelona
Carrer Comte d'Urgell, 187 — 08036
Barcelona, Spain

Irena Wasiak
Politechnika Łódzka
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,
Automatyki i Informatyki
Instytut Elektroenergetyki
ul. Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź, Poland

Введение

Энергосберегающие технологии — это общее для различных инженерных областей название технологий, используемых для повышения эффективности энергопотребления приборами и системами. Поскольку электроэнергия является наиболее гибкой формой энергии, известной людям, и одной из наиболее важных форм энергии, используемой в промышленности и коммерческой сфере, следует уделить особое внимание эффективности ее использования. Таким образом, технологии повышения энергоэффективности — это ряд мероприятий, которые направлены на повышение эффективности использования энергии в различных областях. Такие технологии широко распространены и варьируются от задачи обеспечения качества электрической энергии до теплотехники в электроэнергетических системах с учетом экономических аспектов.

Наряду с электробезопасностью в ближайшие годы эффективность использования электроэнергии станет одним из обязательных критериев при проектировании любых процессов, установок или зданий.

Трудность при разработке технологий энергоэффективности заключается в получении целостного взгляда на ту или иную сферу применения. Определенные знания конкретной технологии требуются в большинстве случаев, но для достижения общей цели энергосбережения абсолютно необходимо глубокое понимание производственных процессов и решаемых задач. Зачастую оптимальные решения частных вопросов обеспечивают недостаточный вклад в общую энергоэффективность процесса. Инженеры должны обладать многопрофильными знаниями, в частности знаниями об электрических системах, качестве электрической энергии, методах контроля и тепловых процессах. Кроме того, важным аспектом квалификации является умение анализировать производственный процесс и определять, какие меры по повышению его эффективности следует предпринять.

Повышение уровня энергоэффективности тесно связано с оценкой, главным образом инвестиционной, соответствующих мер, которые необходимо предпринять. Эффективные решения часто требуют увеличения вложений и обычно нуждаются в одобрении со стороны руководства. Руководитель также должен понимать, как энергосберегающие мероприятия могут повысить эффективность процесса и, тем самым, позволить увеличить производительность.

В 2000 г. группа ученых и промышленников запустила постоянно действующую программу обучения, софинансируемую Европейской комиссией и посвященную проблемам качества электроэнергии под названием «Инициатива Leonardo» (LPQI — Leonardo Power Quality Initiative). Благодаря этому проекту была сформирована сеть экспертов в области энергетики, которые создали несколько дополнительных проектов, таких как LPQIves и Leonardo Energy. Основная информация об этих программах доступна на веб-странице Leonardo Energy (<http://www.leonardoenergy.org>). Вдохновленные этим проектом, некоторые члены рабочей группы внесли свой вклад в подготовку «Справочника по качеству электроэнергии» (Handbook of Power Quality), выпущенного в 2008 г. под редакцией Анджело Багини.

В ходе одного из совещаний по проекту в Брюсселе в 2008 г. родилась идея всеобъемлющей книги о проблемах энергоэффективности, а в последующие годы было проработано содержание книги.

Новаторский подход этой книги заключается в том, чтобы доступно ознакомить читателя с технологиями, позволяющими повысить уровень эффективности использования электроэнергии, и сферами применения таких технологий. Из этой всеобъемлющей книги читатель узнает о различных методах энергосбережения, а также об экспертном мнении по поводу большинства промышленных и коммерческих сфер электроэнергетики. В каждой главе рассматриваются различные мероприятия, направленные на достижение энергоэффективности, в широком диапазоне их сфер применения.

Прежде чем вы приступите к изучению этой книги, мы хотели бы отметить важный вклад всех авторов различных глав со всего мира. Без их экспертных мнений данная работа была бы невозможна. Мы надеемся, что процесс чтения этой книги будет для вас интересным.

Андреас Сампер, Барселона, Испания

Анджело Баггини, Павиа, Италия

Предисловие

Нет никаких сомнений в том, что энергетическая безопасность и изменение климата являются одними из самых часто обсуждаемых тем среди политиков. Сегодня цена на нефть находится на уровне около 100 долларов за баррель и из-за растущего спроса и продолжающегося истощения резервов такой уровень цен будет сохраняться или даже увеличиваться¹. Антропогенный характер изменения климата больше не является предметом обсуждения в научном сообществе, так же как и тревожные новости о том, что его необратимые последствия уже начались и только резкое снижение уровня выбросов CO₂ позволит смягчить их величину и весьма затратное влияние на общество.

Вопросы энергоэффективности и энергосбережения приобретают все большее значение в качестве ключевых составляющих многих национальных и международных стратегий по смягчению последствий изменения климата, повышению безопасности энергоснабжения и конкурентоспособности, сохранению природных ресурсов (в частности энергии, материалов и воды), а также по снижению уровня других видов загрязнения окружающей среды, связанных с энергетикой. Однако уровень инвестиций в разработку и внедрение энергосберегающих технологий в строительстве, производстве оборудования и промышленных системах остается значительно ниже, чем того требуют экономика, энергетика и ситуация с изменением климата.

Стратегии, программы и проекты поддержки энергосберегающих технологий остаются крайне необходимыми для преодоления рыночных, институциональных, финансовых и правовых барьеров, а также для создания благоприятного рынка инвестиций в энергосбережение на том уровне, который будет оправдан рациональным экономическим поведением. В частности, проекты поддержки энергосберегающих технологий очень активно обсуждаются, поскольку считается, что в будущем экономическая составляющая энергосбережения должна быть достаточно высокой, чтобы мотивировать конечных пользователей.

Другая важная проблема связана с пониманием того, что главной задачей в вопросе изменения климата является сокращение абсолютного уровня потребления энергии, если мы хотим смягчить неизбежное воздействие климатических изменений. Снижение энергопотребления может быть достигнуто за счет повышения энергоэффективности используемых систем (технологический аспект) и/или за счет реализации мер по энергосбережению, не обязательно связанных с технологическими усовершенствованиями (поведенческий аспект, к примеру уменьшение перегрева или избыточного охлаждения, сокращение продолжительности использования автомобиля). Энергоэффективность является важной составляющей энергосбережения, поскольку она позволяет использовать меньше энергии для получения необходимого результата (например освещения, охлаждения, отопления). Однако увеличение энергоэффективности, т.е. замена старых

¹ Данные прогноза 2012 года. — *Прим.ред.*

технологий на более энергоэффективные, само по себе не обеспечивает сбережения энергии. Существует множество примеров, когда в результате внедрения более эффективной технологии фактическое потребление увеличивалось из-за эффекта отскока или вследствие установки более мощных приборов, а также большего их количества (большая мощность приборов, более интенсивное их использование).

Интерес к энергоэффективности и энергосбережению возрос среди политиков, экономистов и ученых (с точки зрения технологии, экономики, политики и социальных аспектов). Существует необходимость дальнейшего изучения энергосберегающих технологий (таких как системы управления, светодиодное освещение, частотно-регулируемые приводы и вакуумная изоляция), а также обобщения данных о социально-экономических аспектах потребления энергии. В то же время при активизации действий в области энергоэффективности и энергосбережения возникает необходимость анализа опыта реализации данной деятельности в различных странах, для того чтобы продемонстрировать очевидный вклад повышения энергоэффективности в энергетическую безопасность и смягчение последствий изменения климата.

Паоло Бертольди
Европейская комиссия
Центр совместных научных исследований
Испра, Италия

ГЛАВА 1

Обзор стандартизации в сфере энергетической эффективности

Франко Буа и Анджело Баггини

Столкнувшись с нефтяными кризисами в 1970-х гг., многие страны начали активно внедрять меры по повышению энергетической эффективности во всех сферах экономики. В результате принятых регламентированных подходов и сопутствующих структурных изменений в экономике этим странам удалось преодолеть зависимость экономического роста от потребления энергетических ресурсов.

Темп снижения энергоемкости в разные периоды времени отличался; так, в большинстве стран энергопотребление динамичнее снижалось в период с 1970 по 1990 гг.¹

Согласно информации, предоставленной Международным энергетическим агентством (англ. International Energy Agency — IEA), резкие колебания цен на нефть в 1970-х гг. и выработанное в качестве ответных мер законодательство в области энергопотребления оказали большее влияние на контроль роста потребления энергетических ресурсов и выбросов углеводородов, нежели законодательство в сфере энергетики и охраны окружающей среды, внедренное в 1990-х гг.²

При этом в начале 2000-х гг. наблюдалась тенденция к улучшению ситуации в области энергопотребления, которая, скорее всего, была связана с ростом цен на энергетические ресурсы и повышенным вниманием общественности к вопросам климатических изменений.

Совершенно ясно, что в настоящее время повышение энергетической эффективности является приоритетным направлением политического курса правительств многих стран, поскольку это ключ к решению задач по обеспечению энергетической безопасности, а также проблем в сфере экологии и экономики.

В целях оказания поддержки государственным органам в сфере повышения энергетической эффективности в наиболее приоритетных областях³ многие организации приняли участие в подготовке как рекомендаций, так и конкретных мероприятий. Каждая страна вырабатывает собственную оптимальную стратегию для внедрения мероприятий, направленных на повышение энергетической эффективности, с учетом своей уникальной экономической, социальной и политической конъюнктуры.

¹ IEA (2007), Energy Use in the New Millennium — Trends in IEA countries, OECD/IEA, Paris.

² IEA (2007), Energy Use in the New Millennium — Trends in IEA countries, OECD/IEA, Paris.

³ Например, Международное энергетическое агентство рекомендовало внедрение комплекса конкретных мер в рамках политики энергосбережения на последних четырех саммитах лидеров стран Большой восьмерки; полный перечень рекомендаций доступен по ссылке http://www.iea.org/textbase/papers/2008/cd_energy_efficiency_pohcy/index_EnergyEfficiencyPolicy_2008.pdf

Мировой энергетический совет (англ. World Energy Council — WEC)¹ предлагает следующую классификацию практик и мероприятий² в сфере повышения энергетической эффективности:

• **государственные структуры и программы:**

- государственные структуры — агентства (общенациональные, региональные и местные), департамент соответствующего министерства;
- национальные программы повышения энергетической эффективности с установленными количественными целевыми показателями и законодательными нормами;

• **меры по регулированию:**

- минимальный набор стандартов в области энергетической эффективности и маркировки электрооборудования (например холодильников, стиральных машин, кондиционеров воздуха, осветительных приборов, водонагревателей, двигателей), автомобилей и зданий (вновь построенных и ранее возведенных);
- иные регуляторные требования для установленных категорий потребителей: обязательное введение должности энергетического менеджера, обязательные отчеты об энергопотреблении, обязательное достижение показателей сокращения энергопотребления и обязательное техническое обслуживание;
- обязательства по энергосбережению для энергетических компаний, работающих на потребительских рынках;

• **финансовые и налоговые меры:**

- отраслевые субсидии на оплату расходов при проведении аудитов (в сфере промышленности и торговли, общественные учреждения, домохозяйства, малообеспеченные домохозяйства, транспорт);
- субсидии либо кредитование на льготных условиях (т.е. кредиты с субсидированными процентными ставками) предприятий в различных отраслях, инвестирующих в повышение энергетической эффективности и энергоэффективное оборудование;

• **налоговые меры:**

- отсрочка уплаты налогов;
- ускорение амортизации;
- снижение налогов на инвестиции, направленных на повышение энергетической эффективности, по типам налогов (налог на импорт, НДС, налог на покупку, ежегодный налог на регистрацию транспортного средства) и по типам оборудования (оборудование бытового назначения, автомобили, осветительные приборы);

• **межотраслевые меры:**

- инновационные средства коммуникации;
- добровольные соглашения между государственными органами и участниками производственной деятельности.

Широкомасштабные исследования были проведены в целях определения эффективности политики в области повышения энергетической эффективности.

¹ WEC, Energy Efficiency: A Recipe for Success, 2010, p. 40.

² Полный перечень практик и мероприятий в сфере повышения энергетической эффективности представлен Международным энергетическим агентством (http://www.iea.org/textbase/pm/index_effi.asp).

Например, Международное энергетическое агентство проводит оценку самых передовых практик в данной области, выделяя их сильные стороны и области возможного усовершенствования (табл. 1.1¹ и 1.2²).

Таблица 1.1

Сводные данные преимуществ и инноваций в политике, направленных на повышение энергетической эффективности стран — членов Международного энергетического агентства в строительном, промышленном и транспортном секторе экономики

Здания	<ul style="list-style-type: none"> • Полное внедрение процедуры сертификации зданий в нескольких странах ЕС • Поощрение строительства зданий, обладающих низким, за счет отказа от потребления энергоресурсов из внешней сети, энергопотреблением • Указание требований к энергетической эффективности в строительных нормах и правилах
Промышленность	<ul style="list-style-type: none"> • Большой статистический охват данных по энергопотреблению в промышленности по всем странам • Политика, стимулирующая внедрение энергетического менеджмента • Узкоспециализированная политика для малого и среднего бизнеса • Политика, стимулирующая внедрение когенерации и использование энергоэффективных электродвигателей
Транспорт	<ul style="list-style-type: none"> • Политика, стимулирующая использование экономичных автомобильных шин с низким сопротивлением качению • Стандарты по экономии топлива для легковых и грузовых автомобилей (применимо только в Японии) • Политика поощрения экологически безопасного вождения • Схемы поощрения за утилизацию старых транспортных средств и приобретение более эффективных и безопасных для окружающей среды

Несмотря на огромный потенциал, политику в области повышения энергетической эффективности достаточно трудно реализовать³. Почему же? В результате повышения энергетической эффективности возникают различные препятствия, например отсутствие доступа к финансовым ресурсам, необходимым для инвестиций в повышение энергетической эффективности, недостаточная информированность в области энергосбережения, а также дополнительные издержки, которые не заложены в цены на энергетические ресурсы. Кроме того, нельзя исключать и экономические кризисы, которые могут негативно повлиять на политический курс, направленный на внедрение практик в области энергетической эффективности.

¹ IEA, *Implementing Energy Efficiency Policies*, 2009, p. 23.

² IEA, *Implementing Energy Efficiency Policies*, 2009, p. 33.

³ Существует значительное количество публикаций с критикой в адрес практик и программ, направленных на повышение энергетической эффективности. Критики говорят о том, что внедрение такой политики и таких программ не обосновано либо вовсе обречено на провал. Международное энергетическое агентство опубликовало статью, в которой собраны, классифицированы и проанализированы критические замечания к политике в области энергетической эффективности (см. 7).

Таблица 1.2

**Сводные данные по задачам и областям
для возможного улучшения в политике энергосбережения
стран — членов Международного энергетического агентства
в строительном, промышленном и транспортном секторе экономики**

Здания	<ul style="list-style-type: none"> • Введение более строгих требований к энергетической эффективности зданий • Усиление мер поддержки для зданий, обладающих низким энергопотреблением за счет применения пассивных методов энергосбережения, и зданий с нулевым энергопотреблением • Продвижение внедрения энергосберегающих оконных конструкций и остекления
Промышленность	<ul style="list-style-type: none"> • Внедрение мер по оптимизации энергетической эффективности электроприводного оборудования • Внедрение политики и мер поддержки малого и среднего бизнеса
Транспорт	<ul style="list-style-type: none"> • Обеспечение выполнения предписаний стандартов по эффективности использования топлива в рамках запланированных к внедрению практик • Разработка стандартов по эффективности использования топлива для автомобилей большой грузоподъемности

Программам энергосбережения приходится конкурировать за финансирование с другими приоритетными программами, такими как обеспечение занятости населения, здравоохранение и социальное обеспечение.

1.1. Стандартизация

Как было сказано выше, в процессе повышения энергетической эффективности постоянно возникают препятствия, среди которых недостаточная осведомленность о потенциально возможной экономии энергетических ресурсов, недостоверная информация о текущем уровне эффективности оборудования и его контрольных показателях эффективности, учет эффективности отдельных компонентов оборудования и пренебрежение данными о выработке энергоресурсов и энергопотребления всей системы, конфликт интересов, а также стремление снизить первоначальные затраты на энергосбережение вместо попыток снижения затрат на жизненный цикл оборудования. Применение соответствующих стандартов может помочь в преодолении некоторых препятствий. Например, в стандартах содержится информация об общепринятых методиках измерений и испытаний, необходимых для оценки энергопотребления, способах его снижения посредством применения новых технологий и процессов, а также средствах систематизации наилучших практик и процессов управления, направленных на эффективное потребление энергетических ресурсов и энергосбережение.

Кроме того, в стандартах представлена информация о порядке проверки на предмет соответствия проектным требованиям и методические указания, применимые как на этапе проектирования новых систем, так и в процессе модернизации существующих систем и оборудования. Благодаря стандартам появляется возможность использовать типовые методики расчетов и проводить обоснованные сверки с альтернативными методиками в определенных ситуациях. Также стандарты помогают создать необходимую инфраструктуру для внедрения новых технологий и обеспечить эксплуатационную совместимость.

В следующих разделах приведен обзор текущей деятельности по стандартизации в области энергетической эффективности¹.

1.1.1. Стандарты ISO

Деятельность Международной организации по стандартизации (англ. International Organization for Standardization — ISO) в области энергосбережения началась в июне 2007 г. после того, как рабочая группа по энергосбережению и возобновляемым источникам энергии Совета ISO (далее Совет) определила пять высокоприоритетных направлений, обладающих наибольшим потенциалом с точки зрения оптимизации энергопотребления и сокращения выбросов парниковых газов:

- использование типовых методик расчетов;
- применение стандартов энергетического менеджмента;
- использование биотоплива;
- техническое перевооружение и реконструкция;
- повышение энергетической эффективности зданий.

В соответствии с поручением Совета² технический руководящий аппарат (англ. Technical Management Board — TMB) создал стратегическую консультативную группу (англ. Strategic Advisory Group — SAG) по вопросам энергетической эффективности и возобновляемым источникам энергии³ на первоначальный период в два года (до февраля 2010 г.). Стратегической консультативной группе было поручено консультировать технический руководящий аппарат и оказывать методологическую поддержку в вопросах применения приоритетных стандартов и совершения необходимых действий, включая привлечение заинтересованных сторон и сотрудничество с другими международными организациями, координацию действий ISO и технических комитетов и пр. Основной целью являлось ускорение процесса разработки программы стандартизации в области повышения энергетической эффективности, предназначенной для соблюдения национальных интересов и потребностей рынка.

Стратегическая консультативная группа экспертов подготовила обширный доклад, включающий в себя 66 рекомендаций, получивших одобрение со стороны технического руководящего аппарата. Впоследствии деятельность стратегической консультативной группы была продлена еще на три года.

1.1.1.1. Стандарт ISO 50001

В феврале 2008 г. технический руководящий аппарат одобрил создание нового проектного комитета, ISO/PC 242 «Энергетический менеджмент»⁴, используя уже сложившиеся практики и существующие национальные и региональные стандарты.

Впоследствии стандарт ISO 50001 позволит внедрить международные подходы по управлению энергосистемами объектов промышленного и коммерческого назначения и целых компаний в целях контроля всех вопросов, связанных с энергетическими ресурсами, включая их закупку и потребление. В июне 2011 г. в результате четырех заседаний проектного комитета, проходивших в течение двух

¹ В данном обзоре говорилось о стандартизации, при этом особое внимание уделялось энергетической эффективности с точки зрения системного подхода.

² Resolution 28/2007.

³ ISO Technical Management Board Resolutions 22/2008.

⁴ ISO Technical Management Board Resolutions 15/2008.

лет, был опубликован стандарт ISO EN 50001, который в октябре того же года был утвержден Европейским комитетом по стандартизации (фр. Comité Européen de Normalisation — CEN) и Европейским комитетом электротехнической стандартизации (фр. Comité Européen de Normalisation Électrotechnique — CENELEC). Целью введения в действие стандарта ISO EN 50001 являлось предоставление организациям и компаниям общепринятого подхода для интеграции мероприятий по энергетической эффективности в управленческие практики.

Благодаря ISO 50001 организации и компании получили технические и управленческие стратегии для повышения энергетической эффективности, снижения издержек и улучшения экологических показателей.

1.1.1.2. Совместный проектный комитет 2 ISO/IEC (англ. ISO/IEC JPC 2)

В 2009 г. ISO и Международная электротехническая комиссия (International Electrotechnical Commission — IEC) создали совместный проектный комитет ISO/IEC JPC 2 «Энергетическая эффективность и возобновляемые источники энергии: общая терминология». Основной целью создания комитета являлась разработка стандарта, содержащего единые термины и определения в области энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии, которые были разработаны с учетом специфики различных отраслей техническими комитетами ISO и Международной электротехнической комиссией.

На первом заседании совместного проектного комитета в январе 2010 г. были созданы следующие три рабочие группы (РГ):

- РГ № 1 «Энергетическая эффективность: концепты и схемы», координатор — Американский национальный институт стандартов (ANSI, США);
- РГ № 2 «Материалы из существующих справочных документов», координатор — Шведский институт стандартов (SIS/SEK, Швеция);
- РГ № 3 «Возобновляемые источники энергии: термины и определения», координатор — Французская ассоциация по стандартизации (ANFOR, Франция).

Комитет начал работу по рассмотрению проекта стандарта в октябре 2011 г.

1.1.2. Международная электротехническая комиссия (англ. IEC)

Подходы Международной электротехнической комиссии к энергосбережению изложены в руководстве «Как противостоять энергетическому вызову»¹. Данный документ, разработанный Комитетом по рыночным стратегиям Международной электротехнической комиссии, содержит информацию о мировом спросе на энергетические ресурсы, потенциальных путях удовлетворения спроса на ближайшие 30 лет, а также информацию о непосредственной роли комиссии в данной области.

По мнению Международной электротехнической комиссии, для решения проблем в области повышения энергетической эффективности необходим системный подход, принимающий во внимание все аспекты генерации, передачи и потребления энергии, а также процедуры измерения и методы определения энергетической эффективности для достоверной оценки предлагаемой модернизации и решения технологических проблем (наилучшая доступная технология, англ. Best Available Technology — BAT).

¹ <http://www.iec.ch/smartenergy>

1.1.2.1. Исследовательская группа № 1 «Энергетическая эффективность и возобновляемые источники энергии»

В 2007 г. Международная электротехническая комиссия приступила к учреждению вспомогательных органов для оказания своему управляющему комитету консультативной помощи по стратегическим вопросам, которые будут определять направление будущей деятельности. Среди них была исследовательская группа № 1, в компетенции которой входило решение задач в области повышения энергетической эффективности.

Исследовательская группа № 1 была учреждена в начале 2007 г. для выполнения следующих задач:

- анализ текущей ситуации в области энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии (существующие стандарты Международной электротехнической комиссии и проекты, находящиеся в разработке);
- выявление недостатков и возможностей для новых видов деятельности, входящих в сферу компетенции Международной электротехнической комиссии;
- определение целей для повышения эффективности использования электрической энергии в процессах производства продукции и управления системами;
- формулировка рекомендаций для дальнейших действий.

Впоследствии эксперты из других групп, созданных Международной электротехнической комиссией, и организаций, таких как Международное энергетическое агентство, Международная комиссия по освещению (фр. Commission internationale de l'éclairage — CIE) и т.д., провели встречи для обмена опытом о проделанной работе и достижениях в области энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии.

В результате работы, проведенной Исследовательской группой № 1, появились 34 рекомендации, направленные на ознакомление представителям среднего и малого бизнеса и членам технического комитета в целях получения комментариев.

1.1.2.2. Исследовательская группа № 3 «Интеллектуальные электрические сети»

Необходимо упомянуть еще одну исследовательскую группу, связанную с вопросами повышения энергетической эффективности, а именно исследовательскую группу № 3 «Интеллектуальные электрические сети». Исследовательская группа № 3, основанная в 2008 г., вырабатывает рекомендации в области динамично развивающихся концепций и технологий, которые могут стать основой для новых международных стандартов или разработок технических комитетов Международной электротехнической комиссии в области технологий для интеллектуальных электрических сетей.

Исследовательская группа № 3 разработала общий подход и рекомендации для технических комитетов, вовлеченных в работу над интеллектуальными электрическими сетями, а также создала «Дорожную карту развития интеллектуальных электрических сетей»¹, в которой представлены стандарты обеспечения взаимодействия систем, передачи и распределения, измерений, подключения потребителей и обеспечения кибербезопасности.

¹ http://www.iec.ch/smartgrid/downloads/sg3_roadmap.pdf

1.1.2.3. Исследовательская группа № 4

«Сети электрические распределительные низковольтные напряжением до 1500 В постоянного тока»

Исследовательская группа № 4 была основана в 2009 г. для систематизации, стандартизации и координации деятельности, в ходе которой применяются распределительные сети низкого напряжения (например, в дата-центрах, потребляющих энергию из возобновляемых источников, зданиях коммерческого назначения, в аккумуляторах мобильных устройств и электромобилей, осветительных приборах, мультимедийных системах, информационно-коммуникационных устройствах и пр. оборудовании с блоками питания).

Несмотря на то что работа исследовательской группы № 4 не имеет прямого отношения к повышению энергетической эффективности, она позволяет получить стратегически важные преимущества в случае реализации потенциала повышения энергетической эффективности.

1.1.3. Европейский комитет по стандартизации (фр. Comité Européen de Normalisation — CEN) и Европейский комитет электротехнической стандартизации (фр. Comité Européen de Normalisation Électrotechnique)

CEN и CENELEC с 2002 г. активно принимают участие в анализе проблем стандартизации в области энергетической эффективности и выработке общей стратегии.

Интересным и важным можно считать факт изначальной совместной деятельности CEN и CENELEC с применением единого системного подхода.

Совместная рабочая группа по направлению «Энергетический менеджмент» Технического совета CEN/CENELEC была создана в начале 2002 г. для разработки единообразной стратегии стандартизации в области энергетической эффективности в европейских странах, а также для единого понимания поставленных целей всеми членами CEN/CENELEC.

Данная рабочая группа экспертов выступала в качестве технических консультантов в составе CEN и CENELEC по всем политическим и стратегическим вопросам, относящимся к стандартизации в области повышения энергетической эффективности с 2002 по 2005 гг. Основные результаты работы группы приведены в отчете¹, содержащем обзор предложений по стандартизации в области энергетического менеджмента, разделенных на три уровня в зависимости от присвоенного им приоритета². Этот документ и по сей день является основой деятельности CEN и CENELEC по стандартизации в области энергетической эффективности.

Основные технические органы, принимавшие участие в работе по стандартизации в области энергетической эффективности, перечислены в табл. 1.3, ключевые мероприятия по стандартизации приведены в табл. 1.4.

¹ <http://www.cen.eu/cen/Sectors/Sectors/UtilitiesAndEnergy/Forum/Documents/BTN7359FinalReportJWG.pdf>

² Уровень А — требуется немедленное исполнение; уровень В — требует проведение дальнейших исследований до проведения процедур стандартизации; уровень С — требует обсуждения в рамках стратегического и комплексного подхода, т.е. относится к выбору направления дальнейших действий.

Таблица 1.3

Совместные рабочие группы CEN и CENELEC, ведущие деятельность по стандартизации в области энергетического менеджмента и энергетической эффективности

Технический комитет	Выполняемые задачи
Совместная рабочая группа № 1 «Энергетический аудит»	
Совместная рабочая группа № 2 «Зеленые сертификаты и энергетические сертификаты»	Стандартизация зеленых сертификатов, подтверждающих безуглеродное происхождение энергии, в части продажи таких сертификатов и/или публикуемой отчетности/маркировки как энергоносителя, так и генерирующего объекта, а также энергетических сертификатов
Совместная рабочая группа № 3 «Энергетический менеджмент и сопутствующие услуги: общие требования и квалификационные процедуры»	Для разработки следующих стандартов (европейских норм, англ. Euro Norms — EN) в области энергетического менеджмента и сопутствующих услуг: <ul style="list-style-type: none"> • системы энергетического менеджмента: определения и требования; • энергосервисные компании (ЭСКО, англ. ESCO): определения, требования и квалификационные процедуры; • энергетические менеджеры и эксперты: функциональные обязанности, требования к профессиональной подготовке и квалификационные процедуры
Совместная рабочая группа № 4 «Энергетическая эффективность и расчет экономии энергетических ресурсов»	Стандартизация общих методов расчета энергопотребления, энергетической эффективности, энергосбережения, измерений и верификации протоколов и методологии для определения показателей энергетической эффективности

Таблица 1.4

Стандарты и проекты CEN/CENELEC в области энергетического менеджмента и энергетической эффективности

Код публикации/проекта	Название
EN 16001:2009 (pr = 22320)	Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению (англ. Energy management systems — Requirements with guidance for use)
EN 15900:2010 (pr = 22416)	Услуги по повышению энергетической эффективности. Определения и требования (англ. Energy efficiency services — Definitions and requirements)
Проект европейского стандарта prEN 16247-1:2011 (pr = 23294)	Энергетический аудит. Часть 1: общие требования (англ. Energy audits — Part 1: General requirements)
Проект европейского стандарта prEN 50XXX (pr = 23227)	Зеленые сертификаты в области энергетики. Зеленые сертификаты на электроэнергию (англ. Guarantees of origin related to energy — Guarantees of origin for electricity)
Проект европейского стандарта prEN PT EEB Doc:2010 (pr = 23079)	Методология сравнительного анализа энергетической эффективности (англ. Energy efficiency benchmarking methodology)
EN ISO 50001:2011 (pr = 23639)	Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению (англ. Energy management systems — Requirements with guidance for use)
Проект европейского стандарта prEN 16212:2010 (pr = 23138)	Стандарт методик расчета энергопотребления, энергетической эффективности и энергосбережения «сверху вниз» и «снизу вверх» (англ. Standard on top down and bottom up methods of calculation of energy consumption, energy efficiencies and energy savings)

1.1.3.1. Консультационный комитет по вопросам энергетического менеджмента (англ. Sector Forum Energy Management — SFEM)

Во исполнение рекомендаций совместной рабочей группы по направлению «Энергетический менеджмент» Технического совета CEN/CENELEC был создан консультационный комитет по вопросам энергетического менеджмента (англ. Sector Forum Energy Management — SFEM) в целях разработки общей стратегии стандартизации в области энергетического менеджмента и энергетической эффективности, создания платформы для обмена информацией и опытом между всеми заинтересованными сторонами, а также для определения приоритетов в отношении стандартизации в энергетическом секторе.

Консультационный комитет по вопросам энергетического менеджмента занимается решением следующих задач:

- поддержка и расширение партнерской сети, созданной в период деятельности совместной рабочей группы по направлению «Энергетический менеджмент» Технического совета CEN/CENELEC, особенно в отношении новых членов;
- инициирование новых исследований и оценка областей и объектов, требующих проведения дальнейшей работы по стандартизации, включая области и объекты с присвоенными предыдущей совместной рабочей группой по направлению «Энергетический менеджмент» Технического совета CEN/CENELEC приоритетами В или С;
- координация текущей деятельности по стандартизации в области энергетического менеджмента в европейских странах;
- организация запросов со стороны CEN и CENELEC по части внесения изменений в области энергетического менеджмента в европейское законодательство и общеевропейской стратегии;
- постоянный обмен информацией, опытом и изысканиями, особенно по внедряемым инициативам, как в европейских странах, так и в странах, не входящих в ЕС.

Консультационный комитет проводит собрания дважды в год в целях разработки рекомендаций относительно дальнейших действий для CEN и CENELEC и при этом не ведет какой-либо деятельности в области стандартизации. На основании полученных рекомендаций CEN и CENELEC, как правило, формируются соответствующие технические комитеты (обычно совместные рабочие группы экспертов) для решения поставленных задач.

Дополнительные материалы по теме

1. Geller H., Attali S. The experience with energy efficiency policies and programmes in IEA countries. Learning from the Critics. IEA Information Paper, 2005.
2. IEA, Implementing Energy Efficiency Policies, 2009, OECD/IEA, Paris.
3. WEC, WEC: Energy Efficiency. A Recipe for Success, 2010.

ГЛАВА 2

КАБЕЛИ И ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Паола Пеццини и Андреас Сампер

Пропускная способность систем передачи электроэнергии зависит от рабочего напряжения и максимального передаваемого тока. Поскольку рабочее напряжение фиксированно, то пропускная способность системы при заданном напряжении зависит от пропускной способности проводника при передаче тока.

В таком случае пропускная способность носит название допустимой токовой нагрузки [1], а ее вычисление производится с учетом как параметров установившегося режима, так и расчетных параметров переходных процессов [2]. Расчеты для кабелей воздушной и подземной прокладки незначительно отличаются в связи с различной окружающей средой, с которой взаимодействует кабель. При расчете допустимой токовой нагрузки для кабелей воздушной прокладки следует принимать во внимание солнечное излучение и силу ветра в зоне прокладки кабеля. При расчете допустимой токовой нагрузки для подземных кабелей следует учитывать тип почвы, в которую закладывается кабельная система.

Определение допустимой токовой нагрузки требует проведения тепловых расчетов, поскольку размеры изоляции и токоведущих частей кабеля являются независимыми параметрами, которые взаимосвязаны тепловыми соотношениями. Расчеты пропускной способности кабеля требуют определения температуры проводника при заданной токовой нагрузке. Номинальная допустимая токовая нагрузка прямо пропорциональна диаметру проводника: чем больше диаметр проводника (меньше джоулевы потери), тем выше допустимая токовая нагрузка. С другой стороны, требования к изоляции определяются рабочим напряжением и также непосредственно влияют на величину допустимой токовой нагрузки: высокие требования к изоляции (более низкое тепловое рассеяние) означают более низкую допустимую токовую нагрузку. К параметрам, влияющим на значение допустимой токовой нагрузки, относятся: количество и тип кабелей, тепловое сопротивление среды (почвы или воздуха) вокруг кабеля, глубина прокладки в случае с подземным кабелем, а также горизонтальное расстояние между кабелями системы. Наличие явной связи между током в проводнике и температурой приводит к вопросу о том, как рассеивается тепло, выделяемое при прохождении тока. Решение основных уравнений теплового баланса является первым шагом к получению расчетных номинальных параметров кабеля и его номинальных токовых нагрузок, которые зависят в основном от эффективности процессов рассеяния, наряду с ограничениями, накладываемыми на температуру изоляции.

На сегодняшний день одних только технических критериев недостаточно для получения оптимального размера кабеля. На самом деле минимальное допустимое

сечение, полученное из решения уравнений теплового баланса, не учитывает стоимость потерь, которые будут иметь место в течение всего срока эксплуатации кабеля. Таким образом, при выборе размеров кабеля следует учитывать сумму начальной стоимости и стоимости потерь. Последнюю можно вычислить, оценив рост нагрузки и стоимость энергии. Если сумма будущих затрат на энергопотери и первоначальных затрат на покупку и установку сведена к минимуму, значит, определены оптимальные с экономической точки зрения размеры проводника. Снижение общих затрат при такой оптимизации обусловлено тем, что затраты на джоулевы потери снижаются сильнее, чем увеличивается стоимость приобретения.

2.1. ТЕОРИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Поскольку ток нагрузки и температура проводника неразрывно связаны, в этом разделе приведен обзор теории теплопередачи. Чтобы определить температуру проводника при заданной токовой нагрузке либо, наоборот, допустимую токовую нагрузку для заданной максимальной температуры проводника, необходимо рассчитать тепловую энергию, выделяемую в кабельной системе, и скорость ее рассеивания при заданном материале проводника и заданной нагрузке.

Существуют три основных механизма передачи тепла в различных средах: теплопроводность, конвекция и излучение.

2.1.1. Теплопроводность

Для вычисления теплопроводности используется уравнение, выражающее передачу тепла между двумя контактирующими средами и также известное как закон Фурье:

$$Q = -\frac{1}{\rho} A \frac{d\theta}{dx}. \quad (2.1)$$

Тепловая энергия, передаваемая в направлении x , обозначается Q [Вт] и прямо пропорциональна температурному градиенту $d\theta/dx$ [К/м]. Для заданного температурного распределения $\theta(x)$ [К] данный градиент представляет собой направление и скорость изменения температуры. Здесь A [м²] — это площадь, на которой происходит тепловой обмен, а ρ [К·м/Вт] — это термическое сопротивление, характеризующее качество передачи тепла материала. Минус в уравнении отражает тот факт, что тепло передается в направлении понижения температуры.

Механизм теплопроводности приобретает большое значение при рассмотрении подземных кабелей, когда проводник находится в прямом контакте с другими металлическими частями и изоляцией.

2.1.2. Конвекция

Конвекция — это результат двух механизмов, работающих одновременно: теплопроводности, обусловленной движением молекул, и переноса тепла, обусловленного движением потока среды (жидкости или газа). Уравнение, используемое для описания конвекции, известно как закон Ньютона:

$$Q = hA (\theta_s - \theta_{amb}). \quad (2.2)$$

Таблица 2.1

Диапазон значений коэффициента теплопередачи h

Механизм	Коэффициент теплопередачи h , Вт/(К · м ²)
Естественная конвекция	5—25
Принудительная конвекция	
Газ	25—250
Жидкости	50—20 000
Кипение и конденсация	2500—100 000

Тепловая мощность конвекции Q [Вт] пропорциональна разности между температурой поверхности θ_s и температурой окружающей среды θ_{amb} . Здесь также A [м²] обозначает площадь поверхности теплообмена, а h [Вт/(К · м²)] — коэффициент конвективной теплопередачи.

Конвекцию можно классифицировать по характеру движения текучей среды на принудительную и естественную. Первая возникает, когда поток обусловлен внешними средствами: ветром, насосами или вентиляторами. Вторая возникает в результате разности давлений, которая, в свою очередь, вызвана разностью температур. Конвекцию необходимо принимать во внимание при расчете воздушных кабелей, а коэффициент конвективной теплопередачи h является важнейшим параметром, который необходимо рассчитать. В табл. 2.1 показаны характерные диапазоны значений коэффициента h .

2.1.3. Излучение

Способность передавать энергию путем излучения является характерной особенностью всей материи. Для излучения не нужна среда, т.к. оно представляет собой электромагнитные волны, которые могут передавать энергию в вакууме. Излучаемая тепловая энергия определяется по закону Стефана—Больцмана:

$$Q = \varepsilon A \sigma_B \theta_s^{*4}. \quad (2.3)$$

Тепловая мощность Q прямо пропорциональна абсолютной температуре θ_s^* [K] поверхности A [м²], σ_B — постоянная Стефана—Больцмана ($\sigma_B = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [Вт/(К⁴ · м²)]); ε — излучательная способность поверхности. Излучательная способность — это отношение энергии, излучаемой поверхностью, к энергии, излучаемой абсолютно черным телом при той же температуре, а диапазон ее значений составляет $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

Если излучение попадает на поверхность, то его часть поглощается в соответствии с поверхностной радиационной характеристикой, известной как коэффициент поглощения α [Вт/К⁴ · м²], как показано в следующем уравнении:

$$Q_{abc} = \alpha Q_{inc}, \quad (2.4)$$

где $0 \leq \alpha \leq 1$. Кабели как излучают сами, так и поглощают излучение. Поэтому применяется следующее уравнение:

$$Q = \varepsilon A_f \sigma_B (\theta_s^{*4} - \theta_{amb}^{*4}). \quad (2.5)$$

В кабельных системах воздушной прокладки необходимо также принимать во внимание конвекцию, поэтому итоговое уравнение будет иметь вид

$$Q = hA_c(\theta_s - \theta_{amb}) + \varepsilon A_r \sigma_B(\theta_s^{*4} - \theta_{amb}^{*4}), \quad (2.6)$$

где $A_c [m^2]$ — площадь конвекционной поверхности; $A_r [m^2]$ — площадь излучательной поверхности.

2.2. НОМИНАЛЬНЫЙ ТОК КАБЕЛЕЙ ВОЗДУШНОЙ ПРОКЛАДКИ

Допустимая токовая нагрузка кабелей вычисляется в основном с использованием следующих основных параметров: допустимое повышение температуры, сопротивление проводника, потери и термическое сопротивление. Однако некоторые параметры могут изменяться в зависимости от конструкции и материала кабеля, поэтому следует полагаться на международный стандарт. Кроме того, как будет показано далее, параметры, относящиеся к рабочим условиям, могут изменяться в зависимости от страны.

Для кабелей переменного тока воздушной прокладки допустимая токовая нагрузка определяется как [3]

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5}, \quad (2.7)$$

где $\Delta\theta [K]$ — допустимое повышение температуры проводника в сравнении с температурой окружающей среды; $W_d [Вт/м]$ представляет собой диэлектрические потери на единицу длины на фазу; n — это количество проводников в кабеле; $R [Ом/м]$ — сопротивление проводника переменному току при максимальной рабочей температуре; $T_i [K \cdot м/Вт]$ — тепловое сопротивление, а именно: T_1 — тепловое сопротивление между проводником и внутренней оболочкой, T_2 — тепловое сопротивление между внутренней оболочкой и оплеткой, T_3 — тепловое сопротивление внешней оболочки, а T_4 — тепловое сопротивление окружающей среды.

При оценке потерь учитывается несколько величин: сопротивление переменному току, диэлектрические потери, потери во внутренней оболочке и экране, потери в оплетке, креплениях и стальных трубках. Здесь рассматриваются только сопротивление переменному току и диэлектрические потери, более подробную информацию о потерях на внутренней оболочке, экране, оплетке, креплениях и стальных трубках можно найти в стандарте МЭК 60287-1-1 [3]. С учетом максимальной рабочей температуры сопротивление переменному току на единицу длины проводника задается формулой

$$R = R'(1 + y_s + y_p), \quad (2.8)$$

где $R [Ом/м]$ — сопротивление проводника переменному току при максимальной рабочей температуре; R' — сопротивление проводника постоянному току при максимальной рабочей температуре; y_s — коэффициент поверхностного эффекта (скин-эффекта); y_p — коэффициент эффекта близости. Оценку этих величин можно получить в соответствии со стандартом МЭК 60287-1-1 [3]. Сопротивление

кабеля выше при передаче переменного тока, чем при передаче постоянного тока, главным образом это связано со скин-эффектом, эффектом близости, потерями на гистерезис и вихревые токи в ферромагнитных материалах, а также наведенными потерями в короткозамкнутых неферромагнитных материалах [2]. Обычно рассматриваются только скин-эффект и эффект близости, за исключением случаев кабелей очень высокого напряжения.

Диэлектрические потери на единицу длины для каждой фазы определяются по выражению

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta, \quad (2.9)$$

где $\omega = 2\pi f$; C [Ф/м] — это емкость на единицу длины; U_0 [В] — напряжение относительно заземления. Приложение переменного напряжения к бумажной или твердой изоляции приводит к возникновению зарядных токов, поскольку изоляция выступает в роли большого конденсатора. Каждый раз, когда изменяется полярность напряжения, электроны должны перестроиться, совершив определенную работу, которая переходит в тепло, таким образом приводя к потерям активной мощности, так называемым диэлектрическим потерям [2].

Как можно видеть из уравнения, диэлектрические потери зависят от напряжения, а в табл. 3 стандарта МЭК 60287-1-1 [3] приведены значения U_0 для распространенных изоляционных материалов. Остальные величины, входящие в данное уравнение, также можно найти в той же таблице.

Наконец, рассматривается внутреннее и внешнее тепловое сопротивление кабелей. Тепловые сопротивления T_1 , T_2 и T_3 на единицу длины кабеля определяют по отдельности. Для одножильных кабелей тепловое сопротивление T_1 между одним проводником и его внутренней оболочкой определяется по формуле

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_1}{d_c} \right], \quad (2.10)$$

где ρ_T [К·м/Вт] — тепловое сопротивление изоляции; d_c [мм] — диаметр проводника; t_1 [мм] — это толщина изоляции между проводником и внутренней оболочкой.

Тепловое сопротивление изоляционных материалов приведено в табл. 1 МЭК 60287-2-1 [4]. В той же части международного стандарта даны определения T_1 для бронированных кабелей, трехжильных кабелей, маслонеполненных кабелей, а также кабелей типа SL и SA. Кабели типа SL и SA — это круглые одножильные кабели с металлической внутренней оболочкой, в которых электростатическая лента выполняет роль изоляционного экрана. Аббревиатуры SL и SA означают свинцовую или алюминиевую оболочку (Sheathing with Lead, Sheathing with Aluminium) соответственно [5].

Тепловое сопротивление между внутренней оболочкой и оплеткой для однофазного, двухфазного и трехфазного кабелей с общей металлической оплеткой обозначается T_2 и определяется следующим образом:

$$T_2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_2}{D_s} \right], \quad (2.11)$$

где D_s [мм] — внешний диаметр оболочки; t_2 [мм] — толщина подушки. Для кабелей типа SL и SA определение приведено в стандарте МЭК 60287-2-1 [3].

Тепловое сопротивление T_3 внешней оболочки, которая имеет вид концентрических слоев, задается уравнением

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right], \quad (2.12)$$

где D'_a [мм] — внешний диаметр оплетки; t_3 [мм] — ее толщина. Дополнительный анализ теплового сопротивления для гофрированных оболочек и кабелей трубного типа приведен в стандарте МЭК 60287-2-1 [4].

Оценка теплового сопротивления внешней среды T_4 изменяется в зависимости от того, защищен ли кабель от прямых солнечных лучей или непосредственно подвержен солнечному излучению. В первом случае формула имеет вид

$$T_4 = \frac{1}{h\pi(\Delta\theta_s)^{1/4} D_c^*}, \quad (2.13)$$

где D_c^* [м] — внешний диаметр кабеля для гофрированных оболочек; h — коэффициент рассеивания тепла (см. [4]).

Международный стандарт также задает методы расчета $\Delta\theta_s$ — повышения температуры поверхности кабеля по сравнению с температурой окружающей среды. Для групп кабелей воздушной прокладки, защищенных от солнечной радиации, метод для расчета понижающих коэффициентов приведен в стандарте МЭК 60287-2-2 [6]. Данный метод применим, когда кабели закреплены близко друг к другу, но ограничен:

- максимум девятью кабелями, составленными в квадрат;
- максимум шестью цепями, каждая из которых состоит из трех кабелей, собранных в виде трилистника, при этом до трех цепей могут быть расположены бок о бок или две цепи расположены друг над другом.

Для второго случая, когда кабели подвержены прямому воздействию солнечных лучей, изменение будет заключаться в расчете $\Delta\theta_s$, как подробно описано в стандарте МЭК 60287-2-1 [4].

Конкретные условия эксплуатации кабелей отличаются в зависимости от страны: характерная температура окружающей среды и тепловое сопротивление почвы могут иметь различные значения для разных стран.

В стандарте МЭК 60287-3-1 [7] представлены стандартные рабочие условия, когда параметры взяты не из национальных таблиц.

Национальные параметры доступны для Австралии, Австрии, Канады, Финляндии, Франции, Германии, Италии, Японии, Нидерландов, Норвегии, Польши, Швеции, Швейцарии, Соединенного Королевства и Соединенных Штатов Америки.

Если национальные параметры неизвестны, следует использовать таблицы (табл. 2.2 и 2.3).

Для того чтобы завершить этот этап, покупатель должен получить у производителя кабелей подробный список требуемой информации, необходимой для выбора соответствующего типа кабеля. Должна быть предоставлена информация об условиях эксплуатации и параметрах установки.

Таблица 2.2

Температура окружающей среды на уровне моря

Климат	Температура окружающего воздуха, °С		Температура окружающей почвы на глубине 1 м, °С	
	min	max	min	max
Тропический	25	55	25	40
Субтропический	10	40	15	30
Умеренный	0	25	10	20

Таблица 2.3

Удельное термическое сопротивление грунта

Термическое сопротивление, (К · м)/Вт	Состояние почвы	Погодные условия
0,7	Очень влажная	Всегда влажно
1,0	Влажная	Регулярные ливни
2,0	Сухая	Редкие дожди
3,0	Очень сухая	Мало или совсем нет дождей

С учетом условий эксплуатации информация, необходимая для выбора соответствующего типа кабеля, выглядит следующим образом:

- а) номинальное напряжение системы, U ;
- б) наибольшее напряжение трехфазной системы, U_m ;
- в) грозовое перенапряжение;
- г) частота системы;
- д) тип заземления;
- е) обеспечение условий окружающей среды, например:
 - высота над уровнем моря, если выше 1000 м,
 - внутренняя или наружная установки,
 - чрезмерное загрязнение атмосферы,
 - коммутации элегазового выключателя;
- ж) максимальный номинальный ток: для непрерывной эксплуатации, для периодической эксплуатации и для эксплуатации в аварийном режиме или режиме перегрузки (при наличии такого);
- з) ожидаемые токи симметричных и несимметричных коротких замыканий, возникающих как при замыкании двух фаз, так и при замыкании фазы на землю;
- и) максимальное время, в течение которого кабель выдерживает ток короткого замыкания.

Требуемые параметры установки можно подразделить на общие параметры, параметры для подземных кабелей и для кабелей воздушной прокладки. Подробную информацию о параметрах для подземных кабелей можно найти в [7]. Для общих параметров необходимой информацией являются:

- а) длина и профиль трассы;
- б) способы прокладки, крепления и заземления металлических оболочек;
- в) особые условия прокладки, например, в воде. В отдельных случаях требуется особое рассмотрение.

Для определения параметров кабелей воздушной прокладки необходима следующая информация:

- а) минимальная, максимальная и средняя температура окружающего воздуха;
- б) тип установки;
- в) особенности вентиляции;
- г) подверженность воздействию прямых солнечных лучей;
- д) особые условия, например риск возгорания.

2.3. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Обычно при выборе размера кабеля не учитываются затраты на потери, возникающие в течение его срока службы. По сути, такой выбор делается на основе минимально допустимой площади поперечного сечения, что минимизирует первоначальные инвестиционные затраты на кабель, но не учитывает весь его срок службы. Поэтому следует минимизировать начальные затраты и затраты на потери (см. МЭК 60287-3-2 [8]) с учетом увеличения нагрузки и стоимости энергии, чтобы обеспечить должную минимизацию суммы будущих затрат на энергетические потери и начальных затрат на покупку и установку.

Затраты на покупку и установку складываются с затратами на потери энергии, и в сумме все затраты выражаются в сопоставимых экономических величинах, которые далее обозначаются как «у.е.». Дата покупки поэтому рассматривается как «настоящее», а будущие затраты, связанные с расходами на потери энергии, следует преобразовать в их эквивалентные «текущие значения». Для этого применяется процесс «дисконтирования», так как ставка дисконтирования связана со стоимостью заемных средств. Условия и финансовые ограничения отдельных установок влияют на расчет текущего значения затрат на потери. Чтобы получить это значение, безусловно, необходимо выбрать соответствующие параметры будущего изменения нагрузки, ежегодного увеличения стоимости кВт·ч, а также годовой ставки дисконтирования в течение экономического срока службы кабеля.

Существует два различных способа рассчитать экономически оптимальный размер кабеля. При первом способе для конкретной установки и для каждого размера проводника рассчитывается диапазон оптимальных с экономической точки зрения токов. После этого необходимо выбрать тот размер проводника, диапазон оптимальных токов которого содержит требуемое значение тока нагрузки. Второй метод больше подходит для единичной установки: вычисляется площадь оптимального поперечного сечения для требуемого тока нагрузки, а затем к ней подбирается ближайший стандартный размер проводника. Экономические аспекты не являются единственными, которые необходимо рассматривать при выборе

оптимального размера проводника. Существует следующий ряд других задач, которые необходимо решить в связи с этим.

1. Рассчитать экономически оптимальную площадь сечения.
 2. Убедиться, что кабель вычисленного размера выдержит максимальный нагрузочный ток, который может возникнуть, а также учесть температурные ограничения.
 3. Проверить токи короткого замыкания и утечки на землю.
 4. Проверить пределы падения напряжения.
 5. Учесть другие критерии, которые могут повлиять на установку.
- Наконец, следует также учитывать аспект качества электроэнергии.

2.4. РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОГО ТОКА: СУММАРНЫЕ ЗАТРАТЫ

Первым этапом при определении оптимального размера кабеля является вычисление общей стоимости установки и эксплуатации кабеля в течение его экономического срока службы. Все затраты должны быть выражены в текущих значениях, а уравнение суммарных затрат (CT — Cost of Total) имеет следующий вид:

$$CT = CI + CJ, \quad (2.14)$$

где CI (Cost of Install) — стоимость установленной длины кабеля; CJ (Cost of Joule) — эквивалентные затраты на джоулевые потери в пересчете на текущее значение.

2.4.1. Определение CJ

Затраты, обусловленные джоулевыми потерями, состоят из двух частей: платы за электроэнергию и платы за дополнительные поставки для компенсации потерь.

Затраты на оплату энергии (CE — Cost of Energy) первоначально определяются для энергетических потерь за первый год (EL — Energy Loss) [Вт · ч], которые выражаются как

$$EL = (I_{\max}^2 R I N_p N_c) T, \quad (2.15)$$

где I_{\max} — максимальная токовая нагрузка кабеля в течение первого года; R — сопротивление проводника переменному току с учетом скин-эффекта, эффекта близости и потерь в металлических экранах и оплетке; l — длина кабеля; N_p — количество фазовых проводников в цепи; N_c — количество цепей с такой же величиной и типом нагрузки. Параметр T представляет собой количество часов в год, в течение которых при протекании максимального тока I_{\max} годовые потери энергии равны таковым при фактическом изменяющемся токе нагрузки. Определяется данный параметр по выражению

$$T = \int_0^{8760} \frac{I(t)^2}{I_{\max}^2} dt, \quad (2.16)$$

где t — время в часах; $I(t)$ — ток нагрузки как функция времени.

Наконец, затраты на потери в первый год выражаются как

$$CE = (I_{\max}^2 RIN_p N_c)TP, \quad (2.17)$$

где P — стоимость одного Вт·ч энергии при соответствующем уровне напряжения.

Затраты на дополнительную мощность (CA — Cost Additional) [произвольная валютная единица/год] равны

$$CA = (I_{\max}^2 RIN_p N_c)D, \quad (2.18)$$

где D — плата за потребление в год.

С учетом CE и CA общие затраты (OC — Overall Cost) [у.е.] за первый год являются суммой вычисленных выше составляющих, и если затраты возникают в конце года, то осуществляется пересчет на текущее значение:

$$OC = \frac{(I_{\max}^2 RIN_p N_c)(TP + D)}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)}. \quad (2.19)$$

Текущее значение затрат на энергию [у.е.] в течение N лет эксплуатации в пересчете на дату приобретения кабеля равно

$$CJ = (I_{\max}^2 RIN_p N_c)(TP + D) \frac{Q}{1 + \frac{i}{100}}, \quad (2.20)$$

где Q — коэффициент, учитывающий увеличение нагрузки, увеличение стоимости энергии за N лет и ставку дисконтирования i .

$$Q = \sum_{n=1}^N (r^{n-1});$$

$$r = \frac{\left(1 + \frac{a}{100}\right)^2 \left(1 + \frac{b}{100}\right)}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)}. \quad (2.21)$$

Здесь a и b — увеличение нагрузки и увеличение стоимости энергии за год.

Суммарные затраты [у.е.] вычисляются путем суммирования CI и CJ .

$$CT = CI + I_{\max}^2 RIF \text{ [у.е.]}, \quad (2.22)$$

где параметр F [у.е./Вт] выражается формулой

$$F = N_p N_c (TP + D) \frac{Q}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)}. \quad (2.23)$$

2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Для оценки экономически оптимального размера проводника можно применить два подхода: в первом анализируется диапазон значений экономического тока для каждого проводника в линейке сечений, а во втором рассматривается экономически оптимальный размер проводника для заданной нагрузки.

2.5.1. Диапазон экономически оптимальных токов для каждого проводника в линейке сечений

Для заданных условий установки все размеры проводника имеют диапазон экономически оптимального тока $[A]$, для которого задан верхний и нижний предел. Для заданного сечения проводника верхним и нижним пределами будут

$$I_{\text{ниж}}^{\max} = \sqrt{\frac{CI - CI_1}{Fl(R_1 - R)}};$$

$$I_{\text{верх}}^{\max} = \sqrt{\frac{CI_2 - CI}{Fl(R - R_2)}}, \quad (2.24)$$

где CI — стоимость установленной длины кабеля с рассматриваемым размером проводника, выраженная в у.е., то есть произвольных валютных единицах; R [Ом/м] — сопротивление переменному току на единицу длины проводника рассматриваемого размера; CI_1 [у.е.] — стоимость следующего стандартного проводника меньшего размера; R_1 [Ом/м] — сопротивление переменному току на единицу длины следующего стандартного проводника меньшего размера; CI_2 [у.е.] — стоимость следующего стандартного проводника большего размера; R_2 [Ом/м] — сопротивление переменному току на единицу длины следующего стандартного проводника большего размера.

2.5.2. Экономически оптимальное сечение проводника для заданной нагрузки

Экономически оптимальный размер проводника — это такое поперечное сечение проводника, которое минимизирует функцию суммарных затрат [у.е.]:

$$CT(S) = CI(S) + I_{\max} R(S) IF^2. \quad (2.25)$$

Уравнение для соотношения между $CI(S)$ и размером проводника может быть выведено из известной стоимости кабелей стандартных размеров. Удельное сопротивление проводника [Ом/м] можно выразить как функцию от его поперечного сечения (см. МЭК 60287-1-1):

$$R(S) = \frac{\rho_{20} (1 + y_p + y_s) (1 + \lambda_1 + \lambda_2) [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{S} 10^6, \quad (2.26)$$

где ρ_{20} [Ом/м] — удельное сопротивление проводника постоянному току; y_p — эффект близости, см. МЭК 60287-1-1 [3]; y_s — скин-эффект, см. МЭК 60287-1-1; λ_1 представляет собой коэффициент потерь во внутренней оболочке, см. МЭК 60287-1-1; λ_2 представляет собой коэффициент потерь в оплетке, см. МЭК 60287-1-1 [3]; α_{20} [K⁻¹] — температурный коэффициент удельного сопротивления для конкретного материала проводника при 20 °C; θ_m [°C] — температура проводника; S [мм²] — поперечное сечение проводника кабеля.

Если величину начальных затрат [у.е.] для рассматриваемого типа кабеля и его установки можно аппроксимировать линейной моделью, тогда

$$CI(S) = I(AS + C), \quad (2.27)$$

где A [у.е./м, у.е./мм²] — переменная составляющая затрат, связанная с размером проводника; C [у.е./м] — постоянная составляющая стоимости, которая не зависит от размера кабеля; I [м] представляет собой длину кабеля.

Оптимальный размер [мм] можно получить с помощью решения уравнения для $CT(S)$:

$$S_{cc} = 1000 \left[\frac{I_{\max}^2 F \rho_{20} (1 + y_p + y_s) (1 + \lambda_1 + \lambda_2) [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{A} \right]^{0.5}. \quad (2.28)$$

Этот параметр не будет в точности равен какому-либо стандартному размеру, потребуется провести расчеты с большим и меньшим стандартным размером кабеля, чтобы выбрать наиболее экономически оптимальный.

2.6. ВЫВОДЫ

Расчеты допустимой токовой нагрузки необходимы для того, чтобы установить максимальный ток, который способен выдержать кабель без риска старения или повреждения. Для проведения расчетов допустимой токовой нагрузки необходимо знать технические критерии, а распространенные методы выбора размера кабеля позволяют найти его минимальную допустимую площадь сечения. Таким образом минимизируется первоначальная стоимость, но не минимизируются затраты на потери, которые возникнут в течение срока службы кабеля. За последнее десятилетие стоимость энергии в западных странах быстро возрастает, а новые изоляционные материалы допускают эксплуатацию при более высоких температурах, чем раньше. Вместо того чтобы просто минимизировать первоначальные затраты, необходимо минимизировать сумму начальных затрат и затрат на потери за экономический срок службы кабеля.

Список литературы

1. *Ranasamy Natarajan*. Computer-Aided Power System Analysis, CRC, 2002.
2. *Anders G.J.* Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment, Wiley-IEEE Press, May 2005.
3. МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 % коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения.

4. МЭК 60287-2-1. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2-2. Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления.
5. *Moore G.F. Electric Cables Handbook*, 3rd edn, VICC Cables, 2004.
6. МЭК 60287-2-2. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2-2. Тепловое сопротивление. Метод расчета коэффициентов снижения максимально допустимой токовой нагрузки для групп кабелей, проложенных на воздухе и защищенных от прямого солнечного излучения.
7. МЭК 60287-3-1. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 3-1. Условия эксплуатации. Нормированные условия эксплуатации и выбор типа кабеля.
8. МЭК 60287-3-2. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 3-2. Разделы, касающиеся условий эксплуатации. Экономическая оптимизация размера силовых кабелей.

ГЛАВА 3

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

*Роман Таргос,
Штефан Фассбиндер
и Анджело Баггини*

Силовые трансформаторы являются важной частью электрической сети, поскольку они преобразуют электроэнергию с одного уровня напряжения на другой. После того как электроэнергия производится на электростанции, ее необходимо доставить к местам потребления. Транспортировка электроэнергии осуществляется эффективнее на более высоком уровне напряжения, поэтому напряжение сгенерированной электроэнергии при помощи трансформаторов повышается с 10—30 кВ до уровня напряжения 220—400 кВ и даже более. Силовые трансформаторы располагаются на подстанциях сети электропередачи, как правило, в крупных узлах вблизи больших электростанций, что повышает гибкость сетей передачи и позволяет соединить их с уровнем питающей сети. Установленные там трансформаторы либо автотрансформаторы далее будут именоваться трансформаторами связи сетей.

Поскольку большинство электроустановок работает на уровне низкого напряжения, высокое напряжение необходимо вновь преобразовывать в низкое вблизи от места потребления. Первая ступень понижения — это преобразование до 33—150 кВ. Крупные промышленные потребители зачастую получают электроэнергию именно на этом уровне напряжения. Распределительные компании дополнительно снижают напряжение до стандартного значения низковольтной потребительской сети.

Таким образом, между генерацией и потреблением электроэнергии проходит в среднем четыре ступени трансформации. Для сетей электропередачи и распределения требуется большое количество трансформаторов разных классов и типовых размеров, рассчитанных на широкий диапазон рабочих напряжений. Большие высоковольтные трансформаторы называются силовыми трансформаторами. Последний этап трансформации до напряжения потребительской сети (в Европе это 400/230 В) производится с помощью распределительного трансформатора. Распределительные трансформаторы, эксплуатируемые и принадлежащие распределительным компаниям, поставляют конечным потребителям примерно 70 % электроэнергии и составляют примерно 80 % всего парка распределительных трансформаторов. Существует следующая классификация уровней напряжения:

- сверхвысокое напряжение: сеть электропередачи (>150 кВ) обычно 220—400 кВ (ультравысокое >400 кВ);

- высокое напряжение $70\text{--}150\text{ кВ}$: сети между передающими и распределительными (интерфейс между TSO и DSO);
- среднее напряжение $1\text{--}70\text{ кВ}$ (обычно до 36 кВ);
- Низкое напряжение <math><1\text{ кВ}</math> (например, 110, 240, 690 В).

Силовые трансформаторы позволяют сэкономить большое количество электроэнергии. В различных исследованиях неоднократно производились оценки потенциала снижения потерь электроэнергии в трансформаторах. Например, в 2005 г. портал Leonardo ENERGY сообщил, что во всем мире потенциал экономии электроэнергии только в распределительных трансформаторах составлял не менее 200 ТВт·ч.

Согласно статистическим данным Международного энергетического агентства (МЭА, <http://data.iaea.org>), производство электроэнергии в мире в 2008 г. составило 20 270 ТВт·ч, из которых примерно 10 %, т.е. 2000 ТВт·ч были произведены генераторами, подключенными к низковольтным сетям (ниже 70 кВ), в основном возобновляемыми источниками. Сообщалось о потреблении 16 816 ТВт·ч, в то время как потери составили 1656 ТВт·ч. Сформировав баланс, можно определить, что на собственные нужды энергетическая отрасль израсходовала 1798 ТВт·ч. В то же самое время генерирующие мощности по всему миру составляли 4625 ГВт.

Рассмотрим структуру потерь электроэнергии при ее передаче и распределении. Проведенный в рамках проекта SEEDT анализ показал, что в Европе в 2000 г. зафиксированы следующие потери в трансформаторах (в процентах к общим потерям при передаче и распределении электроэнергии):

- распределительные трансформаторы — 25 %;
- трансформаторы среднего и высокого напряжения — 10 %;
- трансформаторы сети передачи — 10 %.

За последние 10 лет эта доля могла несколько сократиться, однако в оценку потенциала энергосбережения до сих пор не включен ни один из указанных ниже видов оборудования, потери в котором также присутствуют:

- трансформаторы, входящие в блоки с генераторами;
- трансформаторы, которые энергокомпании используют для обеспечения питания собственных нужд (вспомогательного оборудования электростанций);
- трансформаторы систем распределенной генерации электроэнергии, применяемые в основном для подключения к электрическим сетям генераторов, работающих на возобновляемых источниках энергии (в том числе преобразовательные трансформаторы соединения систем переменного тока с системами постоянного тока высокого напряжения).

На долю трансформаторов, установленных в электросетях по всему миру, приходится примерно 40 % всех потерь электроэнергии при передаче и распределении, что в сумме составляет около 650 ТВт·ч. Эта оценка основывается на энергетической статистике с учетом перечисленных ниже условий.

Доля потерь в трансформаторах, составлявшая в Европе 45 %, по данным на 2000 г., уменьшилась (поскольку уже реализованы некоторые мероприятия по энергосбережению) и сейчас примерно на 10 % выше среднемировой вследствие коэффициента мощности.

В то же самое время оценка для Европы не учитывает потери в трансформаторах, перечисленных выше.

Какую же часть указанных потерь можно снизить? Трансформаторы уже являются достаточно эффективным оборудованием, и в настоящее время достигнуты существенные успехи в сокращении потерь. При этом потенциал энергосбережения далеко не исчерпан: конструкции и технологии недостаточно совершенны, а в электроэнергетических системах осуществляется несколько этапов трансформации напряжения. Например, проводившиеся при разработке минимальных стандартов энергоэффективности трансформаторов (MEPS) исследования в США и Европе показали, что при использовании наилучших доступных технологий энергоэффективность распределительных трансформаторов может быть повышена на 1 % по сравнению со средним значением для находящегося в эксплуатации оборудования и на 0,5 % по сравнению с требованиями MEPS. Для силовых трансформаторов разрыв меньше, и традиционные технологии позволяют повысить их энергоэффективность на 0,1—0,2 % по сравнению с существующим уровнем.

Таблица 3.1

**Средняя энергоэффективность
различных типов трансформаторов**

Трансформатор	S , кВА	Плотность тока, А/мм ²	Энерго- эффективность
Микротрансформатор	0,001	7 000	45,00 %
Малый трансформатор	0,100	3 000	80,00 %
Промышленный трансформатор	40 000	3 397	96,00 %
Распределительный трансформатор	200 000		98,50 %
Трансформатор большой мощности	40 000 000	3 000	99,50 %
Трансформатор, входящий в блок с генератором	600 000 000		99,75 %

В среднем можно добиться улучшения на 50 % для всех трансформаторов электрической сети, что позволит сэкономить более 300 ТВт · ч. В данной главе основное внимание будет уделено распределительным трансформаторам.

Действительно, самый большой потенциал повышения энергосбережения имеют сегодня распределительные трансформаторы. Резерв повышения эффективности данного оборудования значителен. Данные трансформаторы имеют очень длительный срок службы, а отношение затрат на потери в течение срока службы к технологической себестоимости относительно высокое. Более крупные силовые трансформаторы в настоящее время уже более энергоэффективны, а их производство (включая разработку) отличается от производства распределительных трансформаторов. Помимо пропорционального соотношения 3/4 для массы, стоимости и потерь, в данном случае снижается также соотношение технологической себестоимости и затрат на потери в течение срока службы, что, в свою очередь, уменьшает привлекательность дальнейшего повышения эффективности. Несмотря на указанное обстоятельство, эта задача по-прежнему актуальна. Как

видно из табл. 3.1, более мелкие трансформаторы гораздо менее энергоэффективны, чем силовые и распределительные. Но их коэффициенты загрузки и готовности столь низки, что с точки зрения оценки затрат за весь срок службы зачастую выгоднее приобретать наиболее дешевые устройства, что показал предварительный анализ заземляющих трансформаторов при подготовке директивы по энергопотребляющей продукции Евросоюза.

3.1. ПОТЕРИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Потери в трансформаторах можно разделить на две основных составляющих: потери холостого хода и нагрузочные потери. Эти типы потерь свойственны всем типам трансформаторов, вне зависимости от области применения либо номинальной мощности. Существуют, однако, еще два вида потерь: дополнительные потери вследствие неидеального качества электроэнергии, а также потери, в большей мере относящиеся к крупным трансформаторам, — потери на охлаждение либо потери в соответствующем вспомогательном оборудовании (вентиляторы и насосы).

3.1.1. Потери холостого хода

Данная составляющая представляет собой потери в сердечнике трансформатора, возникающие, когда на него подается напряжение, даже если вторичная обмотка трансформатора не замкнута. Они также называются потерями в стали или потерями в сердечнике; это постоянная составляющая потерь.

Потери холостого хода, в свою очередь, бывают следующие.

- *Потери на гистерезис*, вызванные фрикционным перемещением магнитных доменов в пластинах сердечника при его намагничивании и размагничивании вследствие изменения магнитного поля. Этот вид потерь зависит от материала сердечника. Кремнистая электротехническая сталь имеет существенно более низкий гистерезис, чем обычная сталь, но металл с аморфной структурой работает существенно лучше, чем электротехническая сталь. Для снижения потерь на гистерезис можно провести специальную обработку материала, например холодную прокатку, лазерную обработку либо направленную кристаллизацию. Как правило, потери на гистерезис составляют более половины общих потерь холостого хода (~50 %—80 %). В прошлом эта доля была меньше (из-за более высоких абсолютных значений потерь на вихревые токи).
- *Потери на вихревые токи*, обусловленные вихревыми токами в пластинах сердечника, индуцированных переменным магнитным полем и в конечном итоге преобразующихся в тепло. Эту составляющую потерь можно снизить, если изготовить сердечник из как можно более тонких пластин, изолированных друг от друга тончайшим слоем лака. Потери на вихревые токи обычно составляют 20—50 % общих потерь холостого хода.

Существуют также менее значительные составляющие (потери на рассеивание и потери в диэлектрике), также возникающие в сердечнике трансформатора, которые обычно составляют не более 1 % общих потерь холостого хода.