

Содержание

Об авторах	13
Предисловие	15
Вспомогательные веб-сайты	21
Благодарности	22
Глава 1. Введение	23
1.1. Введение	23
1.2. Сеть будущего	24
1.3. Движущие силы и цели	26
1.4. Общие принципы обработки сигналов	28
1.5. Выводы	32
Список литературы	33
Глава 2. Энергосистемы и обработка сигналов	34
2.1. Введение	34
2.2. Динамическое перенапряжение	35
2.2.1. Устойчивое перенапряжение	35
2.2.2. Атмосферное перенапряжение	37
2.2.3. Коммутационное перенапряжение	39
2.2.4. Переключения батарей конденсаторов	42
2.2.4.1. Зарядка	42
2.2.4.2. Обесточивание	45
2.2.4.3. Встречно-параллельное подключение батарей конденсаторов	45
2.3. Ток короткого замыкания и компонента постоянного тока	46
2.4. Провалы и броски напряжения	51
2.5. Флуктуации напряжения	53
2.6. Нарушение баланса напряжений и токов	55
2.7. Гармоники и интергармоники	57
2.8. Бросок тока в силовых трансформаторах	69
2.9. Перевозбуждение трансформатора	74
2.10. Переходные процессы в измерительных трансформаторах	75
2.10.1. Насыщение трансформатора тока (ТТ) (Средства защиты)	75
2.10.1.1. Симметричный ток короткого замыкания	75
2.10.1.2. Несимметричный ток короткого замыкания	77
2.10.2. Переходные процессы в емкостных трансформаторах напряжения (ЕТН)	83
2.11. Феррорезонанс	84
2.12. Колебание частоты	85
2.13. Другие явления и сигналы	86
2.14. Заключение	87
Литература	87

Глава 3. Преобразователи и системы сбора данных	89
3.1. Введение	89
3.2. Трансформаторы напряжения (ТН)	90
3.3. Емкостные трансформаторы напряжения	95
3.4. Трансформаторы тока	97
3.5. Нетрадиционные преобразователи	102
3.5.1. Резистивный делитель напряжения	102
3.5.2. Оптический преобразователь напряжения	104
3.5.3. Катушка Роговского	104
3.5.4. Оптический преобразователь тока	106
3.6. Аналого-цифровое преобразование данных	108
3.6.1. Наблюдение и управление	110
3.6.2. Защита	111
3.6.3. Качество электроэнергии	112
3.7. Математическая модель шума	113
3.8. Дискретизация и сглаживающие фильтры	114
3.9. Частота дискретизации для применения в энергосистеме	117
3.10. Работа в условиях интеллектуальной сети и выводы	118
Литература	119
Глава 4. Дискретные преобразования	120
4.1. Введение	120
4.2. Представление периодических сигналов с помощью рядов Фурье	120
4.2.1. Вычисление коэффициентов ряда	124
4.2.1.1. Коэффициент постоянного тока	124
4.2.1.2. Коэффициенты косинуса	124
4.2.1.3. Коэффициенты синуса	125
4.2.2. Экспоненциальный ряд Фурье	126
4.2.3. Взаимосвязь между экспоненциальными и тригонометрическими коэффициентами	127
4.2.4. Гармоники в энергосистемах	128
4.2.4.1. Коэффициент гармоник	129
4.2.4.2. Коэффициент гармоник с учетом величины нагрузки	130
4.2.5. Свойства ряда Фурье	131
4.3. Преобразование Фурье	131
4.3.1. Введение и примеры	131
4.3.2. Свойства преобразования Фурье	137
4.4. Теорема дискретизации	138
4.5. Дискретно-временное преобразование Фурье	142
4.5.1. Пары ДВПФ	144
4.5.2. Свойства ДВПФ	145
4.6. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ)	145
4.6.1. Дискретизация преобразования Фурье	150
4.6.2. Теоремы дискретного преобразования Фурье	151
4.7. Рекурсивное преобразование Фурье	151

4.8. Интерпретация ДПФ как процесса фильтрации	155
4.8.1. Частотная характеристика фильтра ДПФ	158
4.8.2. Асинхронная дискретизация	159
4.9. Z-преобразование	161
4.9.1. Рациональные z -преобразования	164
4.9.2. Устойчивость рациональной передаточной функции	166
4.9.3. Некоторые распространенные пары z -преобразования	167
4.9.4. Свойства z -преобразования	167
4.10. Заключение	168
Литература	168
Глава 5. Основные методы обработки сигналов энергосистем	170
5.1. Введение	170
5.2. Линейные системы с постоянными параметрами	170
5.2.1. Частотная характеристика ЛПП-системы	174
5.2.2. КИХ-фильтр с линейной фазовой характеристикой	176
5.3. Основные цифровые системы и их применение в энергосистемах	179
5.3.1. Системы скользящего среднего: применение	179
5.3.2. Оценка среднеквадратичного значения	180
5.3.3. Интегрирование методом трапеций и билинейное преобразование	183
5.3.4. Дифференцирующие фильтры: применение	185
5.3.5. Простой дифференциатор	189
5.4. Параметрические фильтры в энергосистемах	191
5.4.1. Определение технических требований к фильтрам	192
5.4.2. Фильтр низких частот первого порядка	193
5.4.3. Фильтр высоких частот первого порядка	194
5.4.4. Заграждающий цифровой БИХ-фильтр (узкополосный режекторный фильтр)	195
5.4.5. Коэффициент гармоник во временной области	199
5.4.6. Разложение сигнала с помощью узкополосного режекторного фильтра	200
5.5. Параметрические узкополосные режекторные КИХ-фильтры	201
5.6. Синтез КИХ- и БИХ-фильтров с помощью пакета MATLAB®	202
5.7. Синусные и косинусные КИХ-фильтры	204
5.8. Работа в условиях интеллектуальной сети и выводы	206
Литература	206
Глава 6. Системы с многочастотной дискретизацией и изменение частоты дискретизации	207
6.1. Введение	207
6.2. Основные блоки для изменения частоты дискретизации	208
6.2.1. Интерпретация частотного представления	208
6.2.2. Повышающая дискретизация в частотном представлении	209

6.2.3. Понижающая дискретизация — прореживание в частотном представлении	210
6.3. Интерполятор	211
6.3.1. Соотношение сигналов на входе и выходе интерполятора	213
6.3.2. Система с многочастотной дискретизацией и временной зависимостью. Замечательные тождества	215
6.4. Дециматор	215
6.4.1. Введение	215
6.4.2. Отношение сигналов на входе и выходе дециматора	216
6.5. Дробное изменение частоты дискретизации	217
6.5.1. Изменение частоты дискретизации с помощью MATLAB®	217
6.6. Изменение частоты дискретизации в реальном времени	218
6.6.1. Интерполяция сплайнами	220
6.6.2. Кубическая интерполяция В-сплайном	222
6.7. Заключение	226
Литература	226
Глава 7. Оценивание электрических параметров	228
7.1. Введение	228
7.2. Теория оценивания	228
7.3. Оценка методом наименьших квадратов (МНК)	231
7.3.1. Линейный метод наименьших квадратов	232
7.4. Оценка частоты	235
7.4.1. Оценка частоты по переходу через ноль (IEC 61000-4-30)	236
7.4.2. Краткосрочная оценка частоты по переходам через ноль	240
7.4.3. Оценка частоты по вращению комплексной амплитуды	243
7.4.4. Изменение ширины окна ДПФ	245
7.4.5. Оценка частоты методом наименьших квадратов	246
7.4.6. Узкополосный режекторный БИХ-фильтр	247
7.4.7. Малые коэффициенты и/или малые арифметические ошибки	248
7.5. Оценка комплексной амплитуды	250
7.5.1. Введение	250
7.5.2. Схема автоматической фазовой подстройки частоты (АФПЧ)	253
7.5.3. Оценка с помощью фильтра Калмана	255
7.5.4. Пример оценки комплексной амплитуды с помощью фильтра Калмана	258
7.6. Оценка комплексной амплитуды при наличии постоянной составляющей	260
7.6.1. Математическая модель сигнала в присутствии затухающей постоянной составляющей	260
7.6.2. Имитационный метод	261
7.6.3. Оценка методом наименьших квадратов	262
7.6.4. Усовершенствованный метод оценки ДВПФ	263
7.6.4.1. Синтез окна	265
7.6.4.2. Оценка и поправки параметров	267

7.6.4.3. Сравнение.....	269
7.6.4.4. Реализация с фиксированной точкой.....	270
7.7. Выводы.....	271
Литература.....	271
Глава 8. Спектральный анализ.....	275
8.1. Введение.....	275
8.2. Спектральный анализ.....	276
8.2.1. Понимание природы просачивания спектральных составляющих.....	278
8.2.2. Интерполяция в частотной области: одночастотный сигнал.....	280
8.3. Окна.....	285
8.3.1. Оконный метод в частотном представлении.....	286
8.4. Интерполяция в частотном представлении: многочастотный сигнал.....	290
8.5. Интергармоники.....	294
8.5.1. Типичные источники интергармоник.....	295
8.5.1.1. Системы двойного преобразования.....	295
8.5.1.2. Понижающие преобразователи частоты.....	297
8.5.1.3. Нестационарная нагрузка.....	297
8.5.1.4. Ветровые турбины.....	297
8.5.2. Стандарт МЭК 61000-4-7.....	298
8.6. Обнаружение и оценка интергармоник согласно стандарту МЭК.....	301
8.7. Параметрические методы спектрального анализа.....	305
8.7.1. Метод Прони.....	305
8.7.1.1. Оригинальный метод Прони.....	306
8.7.1.2. Метод наименьших квадратов Прони.....	309
8.7.1.3. Модифицированный метод наименьших квадратов Прони.....	310
8.7.1.4. Важные соображения в отношении оценки Прони.....	313
8.7.2. Методы подпространства сигнала и шума.....	313
8.7.2.1. Сигнальное подпространство.....	313
8.7.2.2. Подпространство шума.....	315
8.7.2.3. Гармоническое разложение Писаренко.....	315
8.7.2.4. Алгоритм MUSIC.....	316
8.7.2.5. Алгоритм ESPRIT.....	318
8.8. Заключение.....	321
Литература.....	321
Глава 9. Частотно-временное разложение сигнала.....	323
9.1. Введение.....	323
9.2. Преобразование Фурье в коротком временном окне.....	327
9.2.1. Интерпретация в виде блока фильтров.....	328
9.2.2. Выбор окна: принцип неопределенности.....	329
9.2.3. Частотно-временная сетка.....	332
9.3. ДПФ со скользящим окном.....	334

9.3.1. ДПФ со скользящим окном: модифицированная схема	335
9.3.2. Применение в энергосистемах	336
9.3.2.1. Рекурсивное ДПФ со скользящим окном (РДПФСО) и моделируемые сигналы	338
9.4. Блоки фильтров	340
9.4.1. Двухканальный блок квадратурно-зеркальных фильтров	342
9.4.1.1. Численный пример	343
9.4.2. Реализация без наложения спектров	344
9.4.3. Условие идеального восстановления — ИВ	344
9.4.4. Нахождение фильтров из $P(z)$	346
9.4.5. Общие блоки фильтров	347
9.4.6. Разложение гармоник с помощью блоков фильтров ИВ	349
9.4.7. Частота дискретизации	353
9.4.8. Выделение четных гармоник	353
9.4.9. Блок фильтров синтеза	354
9.5. Вейвлеты	355
9.5.1. Непрерывное вейвлет-преобразование	356
9.5.2. Обратное непрерывное вейвлет-преобразование	360
9.5.3. Дискретное вейвлет-преобразование (ДВП)	360
9.5.4. Обратное дискретное вейвлет-преобразование	363
9.5.5. Дискретно-временное вейвлет-преобразование	363
9.5.6. Вопросы разработки вейвлет-преобразования	369
9.5.6.1. Моменты обращения в ноль	369
9.5.6.2. Размер носителя	370
9.5.6.3. Регулярность	370
9.5.6.4. Связь между масштабом и частотой	370
9.5.7. Применение вейвлет-преобразования в энергосистемах	372
9.5.8. Реализация вейвлет-преобразования в реальном времени	375
9.5.8.1. Численный пример	376
9.6. Выводы	376
Литература	376
Глава 10. Распознавание образов	379
10.1. Введение	379
10.2. Основы распознавания образов	380
10.2.1. Наборы данных	381
10.2.2. Обучение с учителем и без учителя	382
10.3. Байесовская теория принятия решений	382
10.4. Извлечение признаков из сигналов энергосистем	383
10.4.1. Действующее значение (среднеквадратичное)	384
10.4.2. Дискретное преобразование Фурье	384
10.4.3. Вейвлет-преобразование	384
10.4.4. Кумулянты статистик высших порядков	385
10.4.5. Метод главных компонент	386
10.4.6. Нормировка	387

10.4.6.1. Деление на максимальное значение	387
10.4.6.2. Нормировка по энергии	387
10.4.6.3. Сопоставление минимального и максимального значений	388
10.4.7. Выбор признаков	388
10.4.7.1. Удаление выбросов	388
10.4.7.2. Область неопределенности	389
10.5. Классификаторы	389
10.5.1. Классификаторы минимальных расстояний	390
10.5.1.1. Классификатор расстояний Евклида	390
10.5.1.2. Классификатор расстояний Махаланобиса (Mahalanobis)	390
10.5.2. Классификатор ближайшего соседа	390
10.5.3. Перцептрон	391
10.5.4. Методы наименьших квадратов	395
10.5.4.1. Сумма квадратов ошибок	395
10.5.4.2. Алгоритм минимальной квадратичной ошибки	396
10.5.5. Многослойный перцептрон	398
10.5.5.1. Алгоритм обратного распространения	399
10.5.6. Метод опорных векторов	404
10.5.6.1. Линейно-разделимый случай	405
10.5.6.2. Линейно-неразделимый случай	407
10.5.6.3. Нелинейный случай	408
10.6. Оценка эффективности системы распознавания	412
10.6.1. Оценка вероятности ошибки классификации	412
10.6.2. Набор данных ограниченного размера	413
10.6.2.1. Метод тестовой выборки	413
10.6.2.2. Метод исключения по одному	413
10.7. Примеры распознавания образов в энергосистемах	413
10.7.1. Классификация помех качества электроэнергии	414
10.7.2. Прогнозирование нагрузки в электрических энергосистемах	415
10.7.3. Оценка надежности энергосистемы	416
10.8. Заключение	417
Литература	418
Глава 11. Обнаружение	420
1.11. Введение	420
11.2. Для чего нужно обнаружение сигналов в энергосистемах?	420
11.3. Основы теории обнаружения	421
11.3.1. Обнаружение методом Байеса	421
11.3.2. Критерий Неймана — Пирсона	423
11.3.3. Рабочая характеристика приемника (ROC-кривая)	423
11.3.4. Обнаружение детерминированного сигнала на фоне белого гауссова шума	425
11.3.5. Детерминированные сигналы с неизвестными параметрами	428
11.3.5.1. Неизвестный сигнал	429
11.3.5.2. Неизвестная амплитуда	431

11.3.5.3. Обнаружение методом ОКОП.....	432
11.3.5.4. Обнаружение методом Байеса.....	433
11.4. Обнаружение помех в энергосистемах.....	433
11.4.1. Сигнал энергосистемы.....	434
11.4.2. Оптимальное обнаружение.....	435
11.4.3. Выделение признаков.....	436
11.4.4. Часто используемые алгоритмы обнаружения.....	437
11.5. Примеры.....	437
11.5.1. Защита линии электропередачи.....	437
11.5.2. Алгоритмы обнаружения на основе оценки.....	440
11.5.3. Обнаружение насыщения в трансформаторах тока.....	443
11.6. Работа в условиях интеллектуальной сети и выводы.....	448
Литература.....	448
Глава 12. Приложение вейвлет к флуктуациям мощности.....	450
12.1. Введение.....	450
12.2. Основные положения теории.....	452
12.3. Применение вейвлет при нестационарных источниках генерации и параметрах нагрузки.....	453
12.3.1. Анализ флуктуаций с помощью БПФ.....	453
12.3.2. Методология.....	454
12.3.3. Колебания нагрузки.....	455
12.3.4. Колебания генерации ветряных электростанций.....	457
12.3.5. Интеллектуальная микросеть.....	459
12.4. Заключение.....	461
Литература.....	462
Глава 13. Нестационарные гармоники, дисбалансы и асимметрия.....	465
13.1. Введение.....	465
13.2. Вычисление симметричных составляющих.....	467
13.3. Нестационарный дисбаланс и гармонические частоты.....	468
13.4. Вычисление нестационарных дисбалансов и асимметрий на гармонических частотах.....	469
13.5. Примеры.....	472
13.5.1. Бросок тока.....	472
13.5.2. Просадка напряжения.....	476
13.5.3. Дисбаланс в преобразователях.....	478
13.6. Заключение.....	482
Литература.....	482
Предметный указатель.....	484

Об авторах



Пауло Фернандо Рибейро получил докторскую степень (PhD) в области электротехники в Университете Манчестера и работал в академических кругах, области промышленного управления, электрических компаниях и научно-исследовательских институтах в области проектирования энергосистем, силовой электроники и качества электроэнергии, разработки систем передачи, стратегических исследований силовых коммуникаций, моделирования систем передачи и распределения, космических энергосистем, силовой электроники для генерации на возобновляемых источниках, гибких систем передачи переменного тока, обработки сигналов, применимой в системах электроснабжения, систем хранения энергии на сверхпроводящих магнитах и интеллектуальных сетей. Его профессиональный опыт включает преподавание в американских, европейских и бразильских университетах, кроме того он занимал исследовательские должности в Центре передовых энергосистем в Университете штата Флорида, EPRI и NASA. Он является заслуженным лектором и членом IEEE и IET и написал более 200 рецензируемых статей, глав и технических книг. Он является активным членом технических комитетов МЭК, СИГРЭ и IEEE, в том числе председателем IEEE целевой группы по вероятностно-временным аспектам гармоник и членом рабочей группы 9 МЭК 77А (Методы определения качества электроэнергии) и С4 СИГРЭ.112 (Рекомендации по мониторингу качества мощности: точки измерения, обработка и представление данных).



Карлос Аугусто Дуке получил степень бакалавра в области электротехники в федеральном университете Жуис-ди-Фора, Бразилия, в 1986 году и степень магистра и доктора электротехники в Католическом университете Рио-де-Жанейро в 1990 и 1997 годах соответственно. С 1989 года он является профессором электротехнического факультета Федерального университета Жуис-ди-Фора (UFJF), Бразилия. В 2007 и 2008 году он присоединился к Центру передовых энергосистем (CAPS — Center for Advanced Power Systems) Университета штата Флорида в качестве приглашенного исследователя. Его основные научные работы относятся к области обработки сигналов энергосистем, включая разработку сопроцессора качества электроэнергии, анализатора переменных гармоник и обработку сигналов при оценивании синхронных векторных измерений. В данный момент он является главой Исследовательской группы по обработке сигналов в энергосистемах, UFJF, а также доцентом Бразильского национального института энергетики. Он написал более 120 рецензируемых статей и глав технических книг и является автором нескольких патентов.



Пауло Марсио да Силвейра получил степень доктора электротехники в 2001 году в Федеральном университете Санта-Катарины, Бразилия. Он имеет опыт промышленного проектирования и научно-исследовательской работы в области оборудования энергосистем, подстанций, защиты и качества электроэнергии, эксплуатации энергосистем, исследований и разработки защитных устройств и алгоритмов контроля качества электроэнергии для применения в системах электроснабжения. Он про-

водил исследования по моделированию систем передачи и распределения энергии, мониторингу, измерению и обработке сигналов определения короткого замыкания, обнаружению места замыкания, защитных реле, качества электропитания и учету энергии. Он работал консультантом по качеству электроэнергии и защите энергосистемы, проводя исследования для различных коммунальных служб Бразилии через Бразильское агентство по регулированию электроэнергетики (ANEEL). В 2007 году доктор Силвейра был приглашенным исследователем в Центре передовых энергосистем в Университете штата Флорида в Таллахасси, США, где он работал над цифровым моделированием в режиме реального времени. Сегодня он работает доцентом в федеральном университете Итажуба (UNIFEI) в Бразилии, где в настоящее время он также является координатором аспирантского курса по защите энергосистем, координатором Центра изучения электро-магнитной совместимости для интеллектуальных сетей (CERIn), а также руководителем Института электрических и энергетических систем UNIFEI.



Аугусто Сантьяго Серкейра получил степень доктора электротехники в федеральном университете Рио-де-Жанейро, Бразилия, в 2002 году. В 2004 году он начал свою научно-исследовательскую деятельность в Федеральном университете Жуис-ди-Фора (UFJF), где в настоящее время работает доцентом. Его научно-исследовательская деятельность в основном связана с электронными приборами, обработкой цифровых сигналов, компьютерным (искусственным) интеллектом в энергосистемах и экспериментальной физикой высоких

энергий. Он принимал участие и выступал координатором исследовательских проектах, связанных с вопросами качества электроэнергии, применяя для его мониторинга и диагностики методы обработки сигналов и компьютерного (искусственного) интеллекта. Он является координатором группы UFJF на Большом адроне коллайдере в CERN (Европейская организация ядерных исследований), которая проводит исследования в области приборной базы для экспериментальной физики высоких энергий, обработки сигналов и искусственного интеллекта, которые главным образом касаются обнаружения и оценки сигналов.

Предисловие

Эта книга стала плодом сотрудничества друзей, разделяющих общие интересы, опыт и увлеченность энергосистемами (ЭС) и обработкой сигналов (ОС). В ее основе лежат проекты по обработке сигналов, применительно к вопросам качества электроэнергии (КЭ) и к энергосистемам в целом.

Стремительный рост производительности вычислительных средств и взаимного обогащения приложений, использующих ОС в анализе и диагностике характеристик систем, привел к беспрецедентному развитию новых методов, теорий и моделей.

Авторы осознают значение существующего потенциала для гораздо более широкого круга использования ОС, что обусловлено, в частности, модернизацией энергосистем, внедрением комплексных разработок, ориентированных на технологии интеллектуальных сетей (ИС).

Растущая сложность электрических сетей нуждается в средствах интенсивного и комплексного мониторинга сигналов с их последующей обработкой, необходимой для определения их характеристик, идентификации, диагностики и защиты, а также для более точного исследования природы тех или иных явлений и событий. Обработка сигналов может также использоваться для прогнозирования и упреждения поведения системы.

В области электротехники ОС является принципиально важным средством выявления, разделения, разложения и уточнения различных факторов и параметров сложной физической реальности функционирования электрических систем, в которых различные явления, как правило, сложно взаимосвязаны на фундаментальном уровне и имеют нетривиальные решения.

Цифровую ОС можно квалифицировать по аналитическим аспектам электрических систем, и она может помочь выявить и охарактеризовать разнообразие, единство, смысл и сущностное предназначение электрических параметров, системных явлений и событий.

По мере усложнения электрической сети моделирование теряет способность учитывать влияние множества независимых и взаимосвязанных внутренних факторов. Обработка сигналов имеет дело с реальной системой, а не с абстрактным моделированием или упрощением (хотя ее можно использовать в комбинации с моделированием), поэтому она способна выявить комплексные факторы при помощи множества аналитических инструментов. Следовательно, ОС позволяет инженеру обнаружить и измерить поведение и истинный характер электрической сети.

Сегодня подавляющее большинство аналоговых сигналов преобразуется в цифровые сигналы. В контексте электрических систем такое преобразование выполняется многочисленными вспомогательными интеллектуальными

цифровыми устройствами, которые выполняют функцию управления, измерения, защиты и связи с другими компонентами системы. Более того, качество таких интеллектуальных устройств повышается благодаря их способности производить цифровую обработку сигналов (ЦОС).

Термин ЦОС включает в себя математику, алгоритмы и методы, используемые при обработке сигналов после того, как они были преобразованы в удобную цифровую форму для решения широкого спектра задач, таких как улучшение качества изображений, распознавание и синтез речи и сжатие данных для хранения и передачи [1].

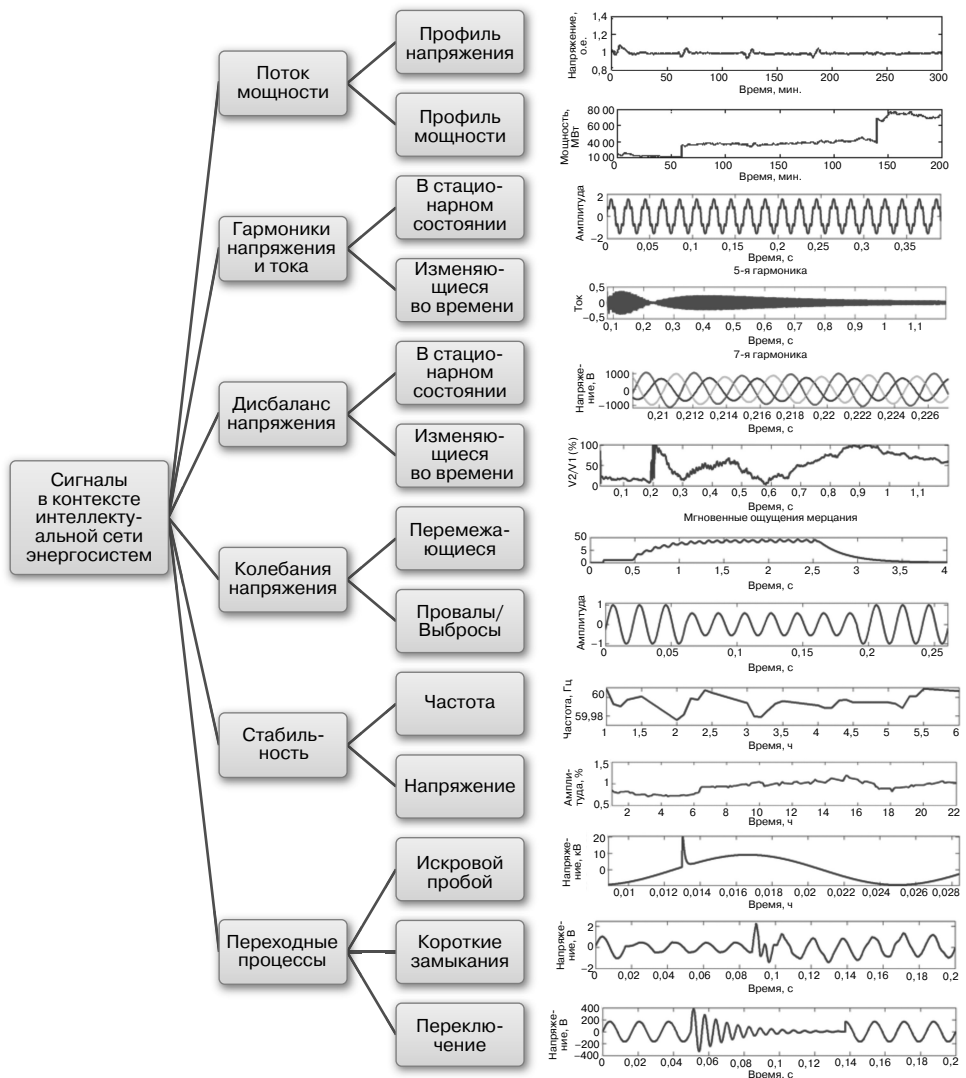


Рис. 1. Сигналы энергосистемы в контексте интеллектуальных сетей

Целью данной книги является дальнейшее продвижение использования ЦОС в энергосистемах, а также расширение ее применения в контексте интеллектуальных сетей. Представлены и рассмотрены различные методы и их применение к типовым и ожидаемым состояниям системы. На рис. 1 для примера показаны формы сигналов энергосистем в контексте традиционной энергосистемы с интеллектуальной сетью.

В главе 1 представлены соображения по использованию обработки сигналов в разных приложениях энергосистем в контексте будущих интеллектуальных сетей. Представлен широкий спектр методов цифровых измерений и анализа данных, необходимый для проведения диагностики и обнаружения корреляционных связей.

В главе 2 приводится полный перечень возможных событий в энергосистеме и явлений, с точки зрения изменяющихся во времени сигналов напряжения и тока, которые характеризуются амплитудой, фазой и формой. Разъясняется, что многие сигналы можно представить в виде математического выражения (например, экспоненциальная составляющая тока, короткие замыкания, искажения формы сигнала).

В главе 3 представлены различные аспекты, связанные с трансформаторами напряжения, трансформаторами тока, аналоговыми фильтрами и аналого-цифровыми преобразователями. Эти компоненты характеризуют источники шума и ошибок и накладывают ограничения на скорость обработки. Из-за отсутствия информации о системах обнаружения электрических сигналов в этой главе рассматриваются некоторые важные требования, которые обычно не упоминаются в литературе по обработке сигналов.

Глава 4 посвящена дискретным преобразованиям, необходимым при анализе и синтезе сигналов энергосистем. В главе описывается дискретно-временное преобразование Фурье (ДВПФ), дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и z-преобразование (преобразование Лорана), а также дан обзор непрерывных преобразований. Хотя эти преобразования широко рассматриваются в большом ряде учебников, здесь основное внимание авторы уделяют специальным и общим их приложениям к энергосистемам.

Глава 5 посвящена основным аспектам обработки сигналов энергосистем. К ним относятся управляющие элементы цифровых сигналов (задержки, сумматоры, умножители), операции с цифровыми сигналами (модуляция, фильтрация, корреляция и свертка), фильтры с конечной и бесконечной импульсной характеристикой. Для иллюстрации этих принципов используются несколько примеров энергосистем.

В главе 6 рассматриваются системы с многочастотной дискретизацией и изменение частоты дискретизации: часто используемый в энергосистемах метод анализа сигналов во времени или изменения частоты дискретизации. При таком

подходе используется линейка фильтров или вейвлет-преобразование. (Линейки фильтров и вейвлет-преобразование рассматриваются в главе 9, но цифровые принципы для реализации этих математических конструкций представлены в главе 6.) Также, применительно к энергосистемам, обсуждаются изменения частоты в режиме относительного и реального времени.

В главе 7 основное внимание уделяется алгоритмам, способным оценивать такие параметры, как комплексный вектор, частота, RMS (среднеквадратичное значение), гармоники и переходные процессы (экспоненциальное затухание) для приложений в отложенном режиме и режиме реального времени. Представлены основные понятия теории оценок, включая неравенство Крамера—Рао (CRLB — Cramer—Rao lower bound), оценку минимальной несмещенной дисперсии, лучшие линейные несмещенные оценки (BLUE — Best Linear Unbiased Estimators) и оценки метода наименьших квадратов (МНК). Сигналы в среде интеллектуальных сетей имеют сложную форму и должны быть правильно и точно измерены.

Глава 8 посвящена основным понятиям спектрального анализа и параметрическим и непараметрическим оценкам спектра. Рассматриваются распространённые ошибки параметрических оценок, включая наложение спектров, потерю волнообразности и размывание спектра. Среди параметрических методов обсуждаются методы Прони, Писаренко, классификации многочастотного сигнала (MUSIC — Multiple Signal Classification) и оценки параметров сигнала с помощью метода вращательной инвариантности (ESPRIT — Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique).

В главе 9 описано единое представление частотно-временного разложения с использованием блоков фильтров и вейвлет-преобразований применительно к энергосистемам. Представлено оконное преобразование Фурье (ОПФ), а также обсуждаются основные принципы теории блоков фильтров и их связь с вейвлетами. Рассмотрена базовая теория вейвлетов и соответствующие методы обработки сигналов. Представлено руководство по выбору материнского вейвлета для энергосистем.

Глава 10 посвящена распознаванию образов, как важнейшему инструменту для эксплуатации и управления проектируемой среды электрической интеллектуальной сети. В главе выделены основные аспекты и необходимые шаги по обеспечению необходимых инструментов для работы с сетью в будущем.

В главе 11 представлены основные аспекты теории обнаружения с использованием байесовской структуры и обсуждается детерминированное обнаружение сигналов для белого гауссового шума.

В главе 12 рассматривается применение вейвлет-анализа для определения характерных форм флуктуаций в различных задачах генерации и потребления. Для этого используется фильтрация среднеквадратичных величин вейвлет-

составляющих, откуда можно определить наиболее подходящие коэффициенты масштабирования. Данная процедура выявляет характерную форму флуктуаций, которая не может быть визуализирована методами частотного разложения.

В главе 13 описываются прикладные задачи, в которых оценка небалансов и асимметрий в энергосистемах может быть упрощена за счет использования метода зависящего от времени разложения, благодаря использованию оконного ДПФ. Изменяющиеся во времени гармоники и их положительные, отрицательные и нулевые последовательности рассчитываются для каждой частоты.

На рис. 2 показана структура книги.

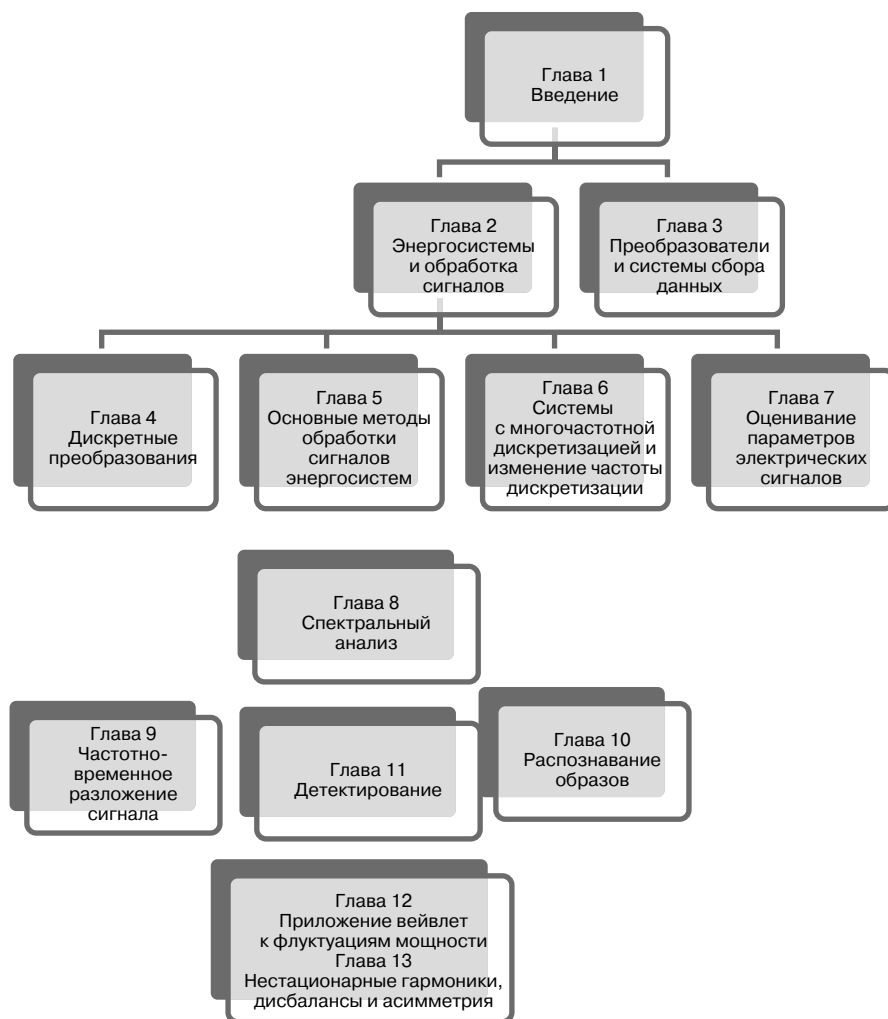


Рис. 2. Структура книги

Наконец, ниже приводятся некоторые философские соображения из трудов британского автора К. С. Льюиса относительно использования и постижения сути этой (или любой другой) книги:

«Научную или инженерную работу, в частности эту, можно просто использовать, а можно постичь ее суть. Когда мы постигаем суть, мы тренируем наше восприятие, воображение и другие умственные способности в соответствии с образцом, предложенным авторами. Когда мы используем ее, то она служит поддержкой нашей собственной деятельности... Использование менее важно, чем постижение сути, поскольку использование чужих работ в науке и инженерном творчестве служит поддержкой и облегчает нам проведение собственных исследований и решение прикладных задач, но не привносит в них ничего нового» [2].

Авторы надеются, что читатель сможет и использовать, и постичь суть книги, которая послужит ценным, создающим почву для размышлений руководством и инструментом.

Список литературы

1. Smith S. W. (1997) *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing.
2. Lewis C. S. (1961) *An Experiment in Criticism*, Cambridge University Press.

Вспомогательные веб-сайты

Для сопровождения этой книги были созданы два веб-сайта, содержащих файлы MATLAB® с дополнительными сигналами типичных нелинейных нагрузок. Они могут быть обработаны различными методами для более глубокого понимания. На сайте для обработки сигналов также доступны два зависимых от времени метода гармонического разложения на базе MATLAB®.

Пожалуйста, посетите <http://www.ufjf.br/pscope-eng/digital-signal-processing-to-smart-grids/>

Пароль: dspsgrid

Или http://www.wiley.com/go/signal_processing

Читатели могут отправлять профессору Пауло Фернандо Рибейро дополнительные сигналы и скрипты MATLAB®, которые будут включены в базу данных, по адресу pfribeiro@ieee.org.

Благодарности

Авторы выражают благодарность аспирантам Тулио Карвалью, Мауро Пратесу, Леандро Мансо, Балларду Асаре-Бедьяко, Владимиру Чуку и Педро Мачадо за их ценную поддержку, а также за комментарии, предложения и помощь в подготовке моделей, иллюстраций и экспериментов, использованных в данном тексте. Также выражаем благодарность доктору Яну Майеру из университета Дрездена за его предложения и вклад в Главу 3, доктору Джасперу Фрунту за его вклад в Главу 12, а также Тулио Карвалью и Тотису Каралиолиосу за их вклад в Главу 13. Благодарим также Адриану С. Рибейро за ее корректуру всех глав и полезные редакционные предложения.

Авторы в особенности благодарны INERGE — Бразильскому научно-технологическому институту электроэнергии, Бразилия, за спонсирование профессора Пауло Рибейро в качестве приглашенного профессора-исследователя в ходе подготовки рукописи. Авторы также признательны Федеральному университету Жуис-ди-Фора, Федеральному университету Итажуба, Техническому университету Эйндховена, Нидерланды, Национальному совету по научно-техническому развитию и Фонду научно-исследовательской поддержки штата Минас-Жерайс, Бразилия.

Авторы хотели бы поблагодарить своих жен и семьи за поддержку в течение последних нескольких лет упорного и тяжелого труда, в ходе которого были разработаны, обновлены и усовершенствованы новые идеи, принципы и эксперименты.

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

I.1. Введение

Энергосистема — это одна из самых сложных систем, созданных человеком. Она представляет собой единую систему, состоящую из генерирующих блоков, подстанций, линий передачи и распределения энергии, а также нагрузок (потребителей электроэнергии). Кроме того, она включает в себя множество другого оборудования — синхронные электрические машины, силовые трансформаторы, измерительные трансформаторы, батареи конденсаторов, устройства силовой электроники, асинхронные электродвигатели и т. д. С этой точки зрения, интеллектуальная сеть еще более усложняет непростую систему, требующую лучшего понимания. В таких условиях обработка сигналов становится важнейшим оценочным инструментом инженера или исследователя, необходимым для понимания, планирования, проектирования и эксплуатации сложной и «умной» электронной сети будущего.

Обработка сигналов используется в самых разных областях и приобретает все большее значение в качестве инструмента для анализа энергосистем. Отчасти это объясняется доступностью широчайшего арсенала цифровых измерений, необходимых для понимания, анализа взаимосвязи, диагностики и разработки ключевых решений в контексте сложных интеллектуальных сетей.

Результаты измерений, полученные в различных точках сети, можно использовать для анализа данных и решения множества задач, таких как:

- регулирование напряжения,
- надежность и качество энергоснабжения,
- диагностика оборудования и энергосистем,
- управление энергосистемой,
- защита энергосистемы.

Эта книга посвящена электрическим сигналам, используемым для анализа энергосистемы в части определения ее характеристик и диагностики, а также в других областях, где могут быть полезны методы обработки сигналов, например, для анализа возможных проблем, связанных с отдельными нагрузками и/или общим состоянием системы.

Существует множество видов оборудования, позволяющего отследить и охарактеризовать состояния системы. Это мониторы, цифровые регистраторы



Рис. 1.2. Многогранность умной сети: технология, заинтересованные стороны, многомерность

доступность различных новых технологий и снятие законодательных ограничений в электроэнергетике.

Запрос общества на устойчивую и низкоуглеродную энергетику, а также проблемы сохранения энергии требуют создания целостной энергосистемы, которая будет играть центральную роль в достижении целей энергетической эффективности и экономичности. Однако широкое внедрение возобновляемых источников энергии и новые формы ее потребления еще больше усложняют систему распределения электроэнергии. Настоятельная потребность в такой сложной интеллектуальной энергосистеме подтверждается многочисленными исследованиями и разработками в данной области.

Общая картина этой новой сложной инфраструктуры показана на рис. 1.1, из которого понятно, что умная сеть будущего станет органичным сочетанием энергосистемы и новых информационных технологий управления.

Многогранность умной сети будущего (показанную на рис. 1.2) можно представить следующими составляющими:

- многомерность направлений развития, широкий охват проблем
- комплексность технологий
- коллизии заинтересованных сторон.

Проектирование технологических систем в рамках сложного социального окружения — это одновременно наука и искусство. Для создания систем, соответствующих всем законодательным нормам и требованиям всех

заинтересованных сторон, новые проекты должны учитывать упомянутую выше меняющуюся реальность. С философской точки зрения, нужна одновременная реализация различных законов и норм, в ходе которой придется органично сочетать противоречащие друг другу цели и интересы всех заинтересованных сторон и при этом комплексно решать сложные технологические и топологические вопросы.

В данном контексте обработка сигналов становится одним из самых важных и эффективных инструментов изучения функционирования такой системы.

1.3. Движущие силы и цели

Научные исследования в области электроэнергетики традиционно обусловлены необходимостью доставки конечным потребителям электроэнергии требуемого качества при наличии колебаний напряжения, тока и частоты, с которыми обычно сталкиваются диспетчеры энергетических систем.

Для того чтобы охарактеризовать расхождения, вызванные этими колебаниями, требуется понимание сути самих явлений. Среди возможных тем исследований — потребность в эффективном представлении изменений напряжения и тока и в обработке сигналов для того, чтобы понять, как ведет себя оборудование. Существует также потребность в непрерывном мониторинге, который может зафиксировать отклонения, события и изменения и выявить их корреляцию с работой оборудования, а также в алгоритмах декомпозиции, моделирования, параметрического оценивания и идентификации.

Цель данной книги заключается в представлении возможностей более широкого и эффективного использования инструментов обработки сигналов для анализа электрической энергии и энергосистем. Авторы применяют комплексный подход к обработке сигналов в энергосистемах, основанный на критическом анализе недавно разработанных и новаторских методик. Основные методики иллюстрируются, сравниваются и применяются к различным сигналам энергосистем.

Рассматриваются как традиционные, так и новейшие инструменты обработки сигналов при мониторинге и управлении энергосистемами. Чтобы обеспечить соответствие будущим требованиям, потребуется задействовать различные подходы и методики для исследования того разнообразия сигналов, которое возникает в ходе сложного взаимодействия поставщиков, потребителей и операторов электросетей. В этой книге не только обсуждаются теоретические концепции, но и демонстрируются примеры их практического применения.

Как инженеры, исследующие и проектирующие электрические сети, справляются с этим все возрастающим уровнем сложности? Может ли инженер учесть всю сложность таких систем? В ходе разработки внимание обычно

сосредоточено лишь на нескольких аспектах, компонентах или системах либо на интересах какой-то одной стороны. Иными словами, сложная система сводится к упрощенной аккуратно выстроенной подсистеме для проектирования нового компонента, изучению его функционирования и оптимизации его стабильности. Этот очень практичный подход использовался многие годы благодаря тому, что система в целом не претерпевала существенных изменений, и эмпирические инженерные знания позволяли корректно упростить ее. К сожалению, прямым следствием такого подхода стал тот факт, что рассматривается не вся система в целом, а лишь урезанная ее часть.

В исследованиях и разработках невозможно избежать упрощений. Инженеры и исследователи должны постоянно отдавать себе отчет в том, что они работают в упрощенных и урезанных условиях. Поэтому нужно постоянно задаваться вопросом, не упущено ли что-то существенное и важное. На практике инженерам трудно справляться со всем многообразием технических и не относящихся к технике аспектов энергосистемы из-за огромной сложности интеллектуальных сетей и противоречивых требований заинтересованных сторон, в том числе правительства и общества. Поэтому можно упустить из виду важные аспекты

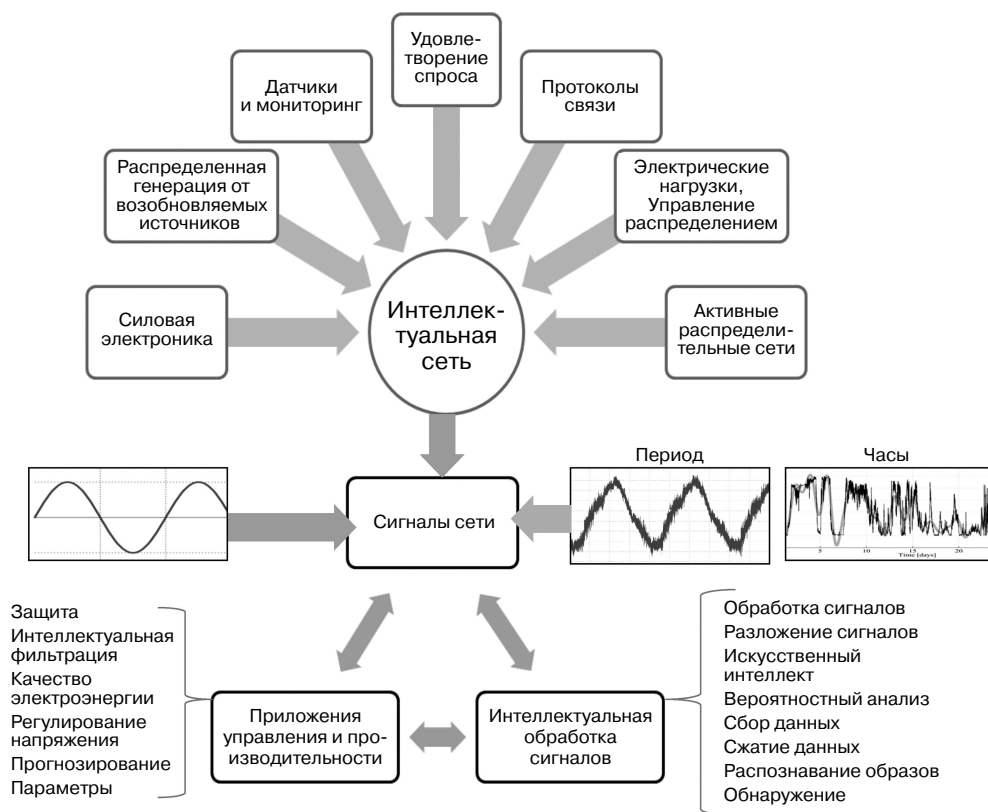


Рис. 1.3. Сигналы, технологии и взаимодействие

взаимодействия технических систем, интересы отдельных сторон и потерять большой объем информации. Взаимодействие множества участников создает очень сложные сигналы, которые необходимо отслеживать и обрабатывать для того, чтобы определять состояние и проектировать оборудование и системы, как показано на рис. 1.3.

1.4. Общие принципы обработки сигналов

Состояние сети можно полностью оценить с помощью измерений и анализа сигналов в различных точках системы. На рис. 1.4 представлена базовая система сигналов и параметров, которые можно получать и обрабатывать поэтапно.

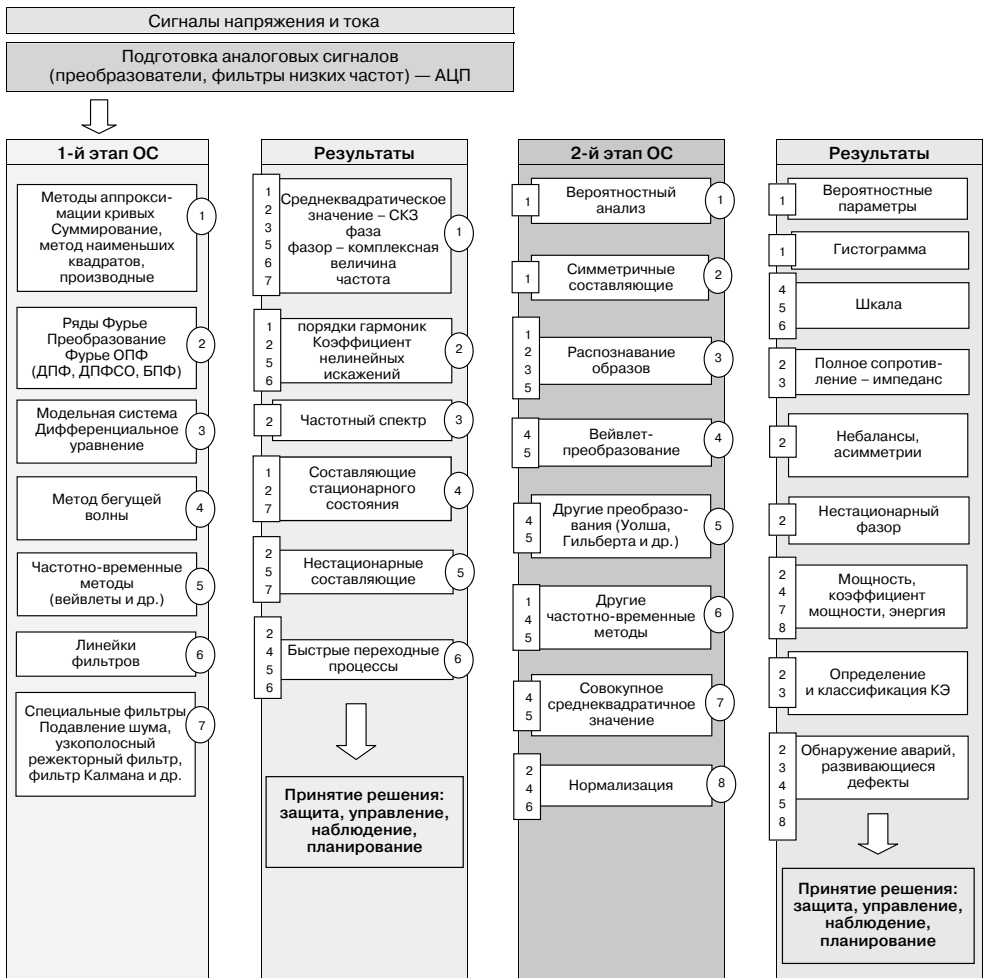


Рис. 1.4. Базовая система сигналов и параметров, которые можно получать и обрабатывать



Рис. 1.5. Последовательность измерений, мониторинга и обработки сигналов



Рис. 1.6. Развитие обработки сигналов



Рис. 1.7. Процессы обработки сигналов

На первом этапе трехфазные сигналы раскладываются на нестационарные гармоники, а затем они обрабатываются по симметричным составляющим. Полученные результаты позволяют инженеру наглядно увидеть характер нестационарных дисбалансов и асимметрий в энергосистеме.

Рис. 1.5. обобщает процесс обработки сигналов, включая измерения, мониторинг и обработку полученных результатов, т. е. процессы получения, анализа, обнаружения, извлечения и классификации сигналов, которые могут нести полезную информацию, позволяющую обнаружить и распознать события, явления и характеристики нагрузок в системе.

По мере развития умных сетей появляются все новые инструменты обработки сигналов, однако не стоит забывать, что развитие обработки сигналов как таковой началось в конце 70-х годов 20 века. На рис. 1.6 проиллюстрирован

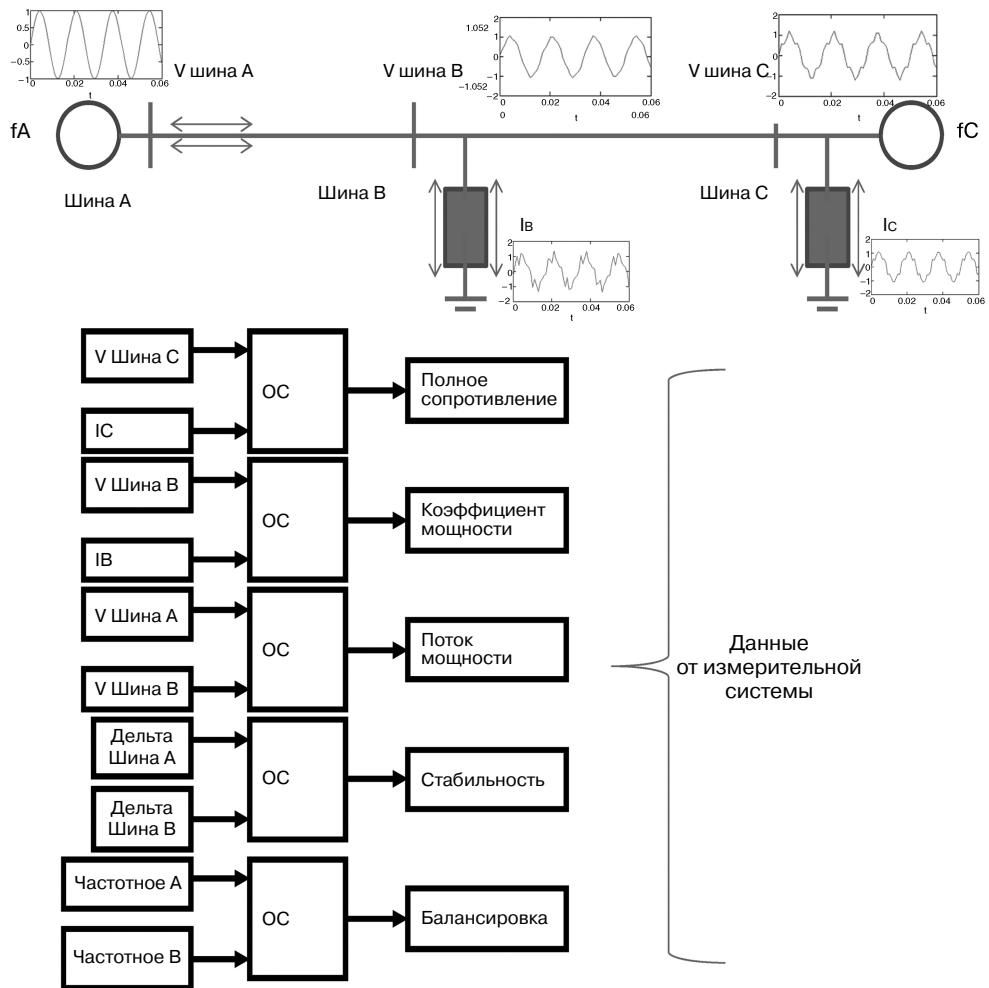


Рис. 1.8. Комплексный анализ обработки сигналов в масштабах всей системы

ход этих разработок, начиная с преобразований Фурье и заканчивая частотно-временными разложениями, анализаторами и расширенной обработкой сигналов для умных сетей. Рис. 1.7 обобщает различные аспекты обработки сигналов в интеллектуальных сетях, с акцентом на специфичные для них задачи, методы и характеристики.

На рис. 1.8 проиллюстрирован комплексный подход к использованию обработки сигналов. Здесь видно, что сигналы напряжения и тока в конкретной точке (даже удаленной) можно использовать для определения полного сопротивления, коэффициентов мощности, потока мощности, стабильности и так далее, а диспетчер системы может использовать эту информацию для более эффективного управления электрической сетью.

И наконец, на рис. 1.9 показан общий вид системы с выделением тех точек сети, в которых может происходить обработка сигналов, дающая важную информацию диспетчерам системы.

Измерения параметров и качества электроэнергии могут быть увязаны с использованием устройств векторных измерений (УВИ), широкополосных сетей (WAN), домашних сетей (HAN) и локальных сетей (LAN), а также с достижениями в области информационно-коммуникационных технологий (ИКТ).

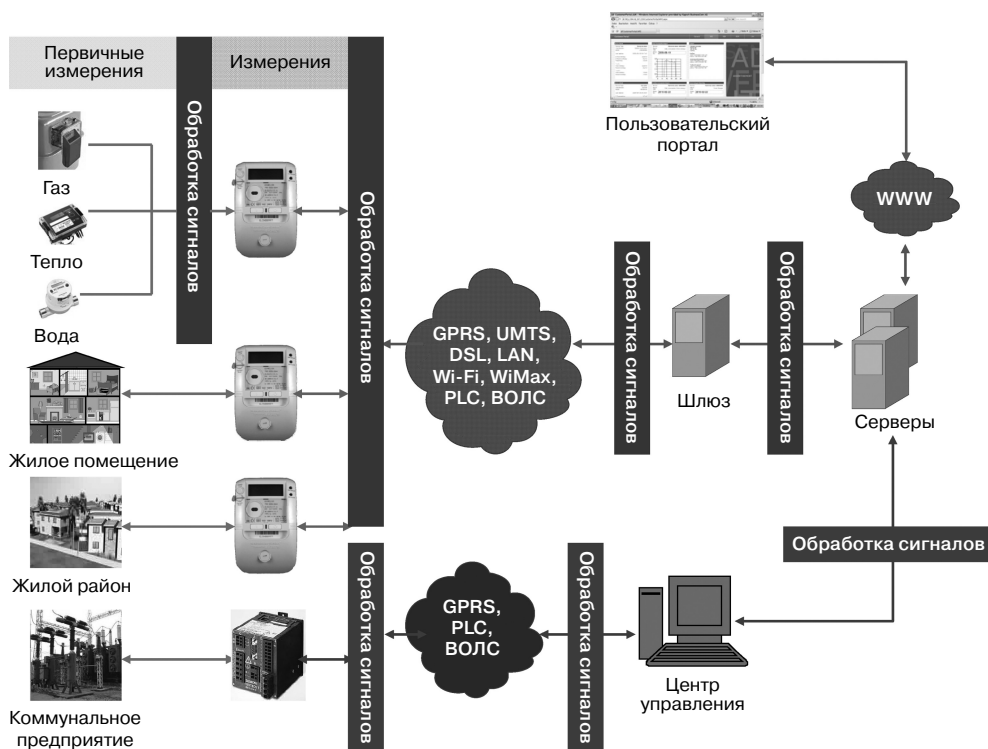


Рис. 1.9. Общий вид системы обработки сигналов

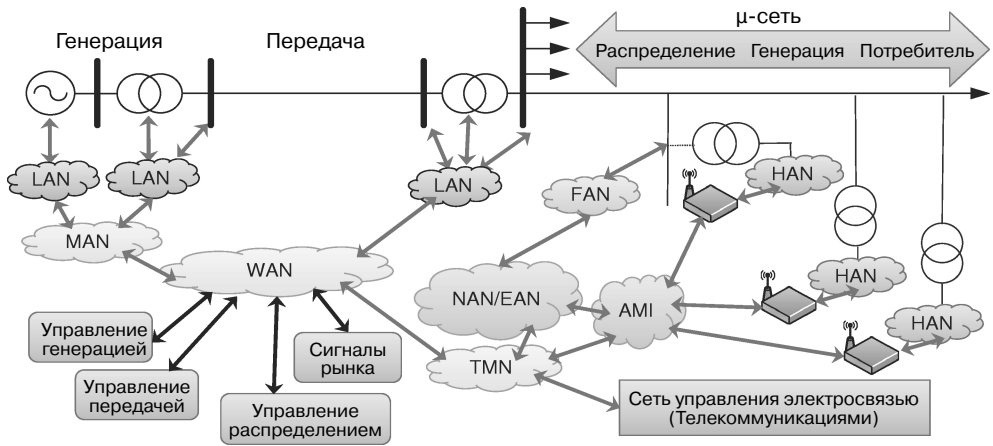


Рис. 1.10. Комплексная передача и распределение в интеллектуальной сети будущего (LAN — локальная сеть; MAN — городская сеть, сеть большого города; WAN — глобальная сеть; TMN — сеть управления электросвязью)

При этом методики обработки сигналов можно использовать для управления, защиты и диагностики работы сложных передающих и распределительных умных сетей будущего (см. рис. 1.10).

Опубликованы превосходные работы [1–7], описывающие типы измерений и их характеристики в соответствии с требованиями к определению качества электроэнергии и других эксплуатационных показателей энергосистем.

1.5. Выводы

В этой главе дан общий обзор вопросов, рассматриваемых в книге. Мы делаем акцент на том, как совместно использовать традиционные и передовые методики обработки сигналов для мониторинга и управления энергосистемами, особенно в контексте сложных интеллектуальных сетей будущего. Методики позволяют исследовать весь спектр сигналов, связанных с взаимодействием большого количества источников производства энергии и активных потребителей с нелинейными и нестационарными нагрузками. Растущая сложность электрических сетей, обусловленная развитием и внедрением технологий и систем умных сетей, требует совершенных технологий обработки сигналов. Авторы надеются, что книга будет способствовать распространению знаний об обработке сигналов, а также подскажет новые возможности и сферы применения.

Список литературы

1. Европейский стандарт EN50160 (1999) Характеристики напряжения электроэнергии, подаваемой от общих распределительных систем, CENELEC, Брюссель, Бельгия.
2. CIGRE WG C4.07 (October, 2004) Power quality indices and objectives. Technical Report No 261. CIGRE/CIRED Working Group C4.07, Power Quality Indices and Objectives, CIGRE Technical Brochure TB 261, Париж.
3. Европейский стандарт EN50160 (2007) Характеристики напряжения электроэнергии, подаваемой от общих распределительных систем, CENELEC, Брюссель, Бельгия.
4. ERGEG (Декабрь 2006 г.) Towards voltage quality regulation in Europe. ERGEG public consultation paper E06-EQS-09-03.
5. Council of European Energy Regulators (December, 2012) Guidelines of good practice on the implementation and use of voltage quality monitoring systems for regulatory purposes. Council of European Energy Regulators ASBL Energy Community Regulatory Board.
6. IEC 61000-4-30 (2003) Методы испытаний и измерений — методы измерения качества электроэнергии. International Electrotechnical Commission, Женева, Швейцария.
7. IEEE PC37.242/D11 (Октябрь 2012 г.) IEEE Draft Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMU) for Power System Protection and Control. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ГЛАВА 2

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

2.1. Введение

Ключевой аспект обработки сигналов в системах электроэнергетики заключается в том, какие и с какой точностью параметры следует измерять и какие методы следует применять для того, чтобы лучшим образом проанализировать и охарактеризовать исследуемые сигналы. Например, во многих видах исследований для адекватного оценивания достаточно ограничиться измерениями только напряжения. Однако существует множество задач, где требуются измерения тока, частоты, активной и реактивной мощности.

Изучение и применение методов цифровой обработки сигналов управления, защиты, наблюдения и мониторинга интеллектуальных сетей требует понимания поведения электрической системы, как в нормальных, так и в необычных или нехарактерных ситуациях. Любой измеренный первичный синусоидальный сигнал (напряжения и тока), исходя из различных соображений исследования, может быть видоизменен таким образом, что форма сигнала приобретет характеризующие этот сигнал признаки.

В данной главе описаны основные переходные и установившиеся процессы в энергосистемах, представленные напряжением и током. Цель состоит в том, чтобы охарактеризовать каждое из них по их амплитуде, фазе и форме сигнала. Кроме того, мы покажем, что многие параметры этих сигналов, например, для экспоненциально изменяющегося тока, повреждений, гармоник и других можно представить математическими выражениями.

Однако это не относится к полностью случайным сигналам, таким как феррорезонанс, субсинхронные колебания и флуктуации напряжения. Явления, которые порождают такие сигналы, содержат сильно выраженные нелинейные элементы, такие как сопротивление дуги, стальные сердечники и т. д.

Принимая сказанное выше во внимание, можно сделать вывод, что многие из упомянутых явлений могут быть воспроизведены с помощью имитационных моделей, а другие могут быть представлены только с помощью специальных измерений.

Наконец, в этой главе будет показана важность понимания возникающих в энергосистеме явлений, что необходимо для правильного использования подходящих инструментов обработки сигналов. Это особенно актуально с появлением интеллектуальных сетей и возросшей сложности энергосистем.

В следующих разделах описываются различные типы сигналов в различных условиях электрических систем. Здесь рассматриваются только наиболее распространенные виды сигналов из всего обширного множества упомянутых здесь сигналов. Электрические сигналы электрической сети можно сравнить с представлением электрокардиограммы (ЭКГ), которая характеризует собой функцию биений человеческого сердца, давая представление о его работе и здоровье. Точно так же оценка электрических сигналов электрической сети дает инженеру-электрику возможность диагностировать и прогнозировать возможные неисправности в работе электрической системы.

2.2. Динамическое перенапряжение

2.2.1. Устойчивое перенапряжение

Устойчивое перенапряжение означает повышение амплитуды напряжения промышленной частоты (50–60 Гц) с выходом за пределы диапазона номинальных значений. Такое перенапряжение может возникнуть в различных местах энергосистемы, например на выходе генератора или на нагрузке. Пример устойчивого перенапряжения показан на рис. 2.1.

Как правило, основной причиной перенапряжения в электрической энергосистеме является избыток реактивной мощности. В течение определенного периода времени реактивная мощность, потребляемая индуктивными нагрузками, перестает потребляться из-за изменения режима. Непосредственным следствием этого избытка является увеличение напряжения в различных частях и компонентах системы.

В частности, для линии электропередачи перенапряжение может возникнуть на приемном конце, либо в момент отключения нагрузки, либо во время ее подключения, когда приемный конец разомкнут. Данный эффект называется емкостным эффектом (а также эффектом Ферранти¹), который обусловлен падением напряжения на полном сопротивлении линии и потерями зарядного тока емкости. Это может произойти, когда линия находится под напряжением с разомкнутым концом, — без нагрузки, что ведет к увеличению напряжения в конце линии.

¹ Эффект, названный в честь его первооткрывателя Себастьяна Зиани де Ферранти. (Sebastian_Ziani_de_Ferranti). — *Прим. ред.*

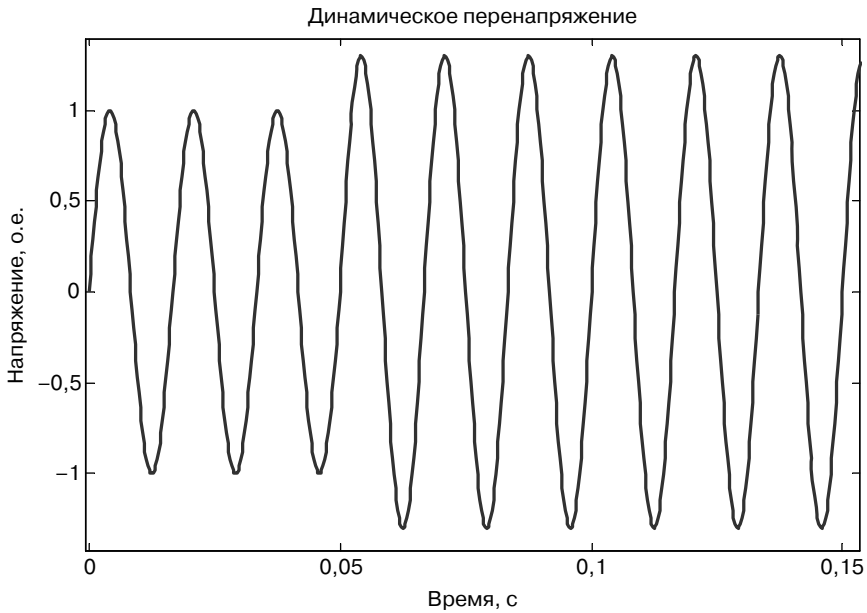


Рис. 2.1. Пример перенапряжения

Таким образом, индуктивность, и емкость линии способствуют возникновению этого эффекта. Эффект будет выражен тем сильнее, чем длиннее линия и чем выше напряжение. При этом значения сопротивления, индуктивности и емкости длинной линии электропередачи необходимо рассматривать как распределенные параметры. На рис. 2.2 показан эффект протекания реактивной (не активной) мощности в направлении источника напряжения, когда напряжение на приемной стороне (R) выше, чем на передающем конце (S).

В зависимости от интенсивности и продолжительности воздействия устойчивого перенапряжения снижают показатели изоляции силового оборудования.

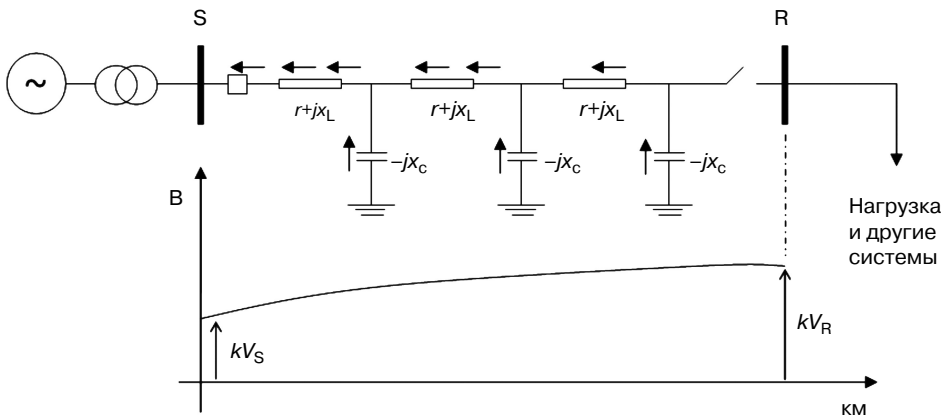


Рис. 2.2. Профиль напряжений в линии электропередачи с разомкнутым концом

Например, в трансформаторах и шунтирующих реакторах (индуктивно-стях) перенапряжение может привести:

- к чрезмерному току из-за насыщения сердечника; такой ток будет искажен гармониками и, следовательно, вызовет нежелательные помехи в остальной части системы;
- к локальному повреждению из-за перегрева, поскольку магнитное поле при насыщении поддерживается на высоком уровне;
- к преждевременному старению изоляции (потере изоляционных свойств).

Поэтому при отключении оборудования и/или линий электропередачи необходима соответствующая защита от перенапряжения.

2.2.2. Атмосферное перенапряжение

Молния может быть источником значительных скачков напряжения. Она может ударить в любом месте электрической системы и воздействует на оборудование и подключенные нагрузки. Это справедливо как для высоковольтных (ВВ), так и для низковольтных (НВ) устройств.

Электрические заряды накапливаются в грозовых облаках до такой величины, что могут пробить воздушную изоляцию. Существует вероятность возникновения электрического разряда от облаков до земли, а ток может достигать 20–200 кА.

Если разряд молнии происходит прямо в линию электропередачи или в непосредственной близости от нее, это вызывает серию электрических разрядов (вспышек). Эти разряды перемещаются со скоростью, близкой к скорости света, и проходят по проводнику непосредственно к подстанции. Кроме того, сама подстанция может подвергнуться удару молнии. Когда эти высокие токи разряжаются через систему заземления подстанции, могут возникать значительные всплески напряжения.

Грозовое перенапряжение также может быть индуцированным. Это происходит, когда электростатическая или электромагнитная индукция создает напряжение на кабелях, расположенных в непосредственной близости от точки удара молнии, например на экранирующем проводнике.

Продолжительность грозовых перенапряжений составляет от микродо миллисекунд. Когда переходные процессы достигают оборудования (трансформатора, реактора или гирлянды изоляторов), разряд может вызвать пробой в изоляции и стать причиной короткого замыкания.

Основную защиту подстанций обеспечивают разрядники высокого напряжения¹. Они устанавливаются на входе ЛЭП и силовых трансформаторов. Трансформаторы и другое оборудование также могут быть защищены так называемыми

¹ Помимо разрядников применяются ограничители перенапряжения. — *Прим. ред.*

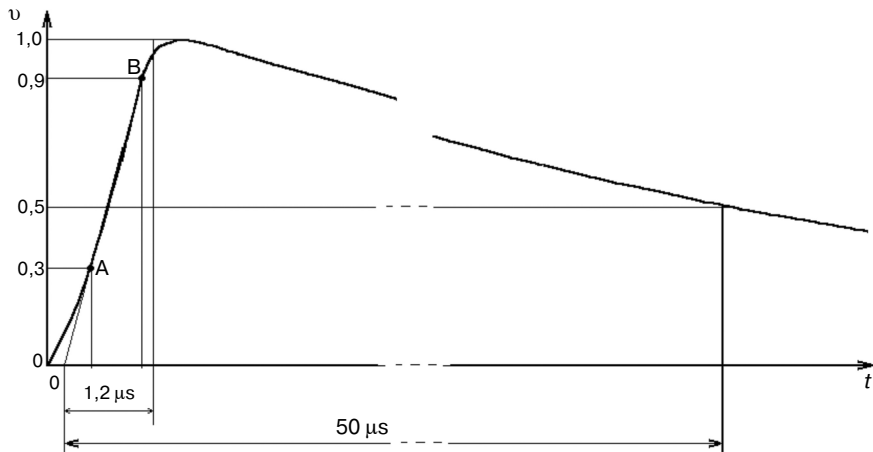


Рис. 2.3. Стандартное напряжение разряда молнии

искровыми разрядниками перенапряжения. Важно упомянуть, что любые переходные процессы в первичном контуре (высокого напряжения), вызванные молнией, также влияют на вторичные контуры через емкостные трансформаторы напряжения (ЕТН), трансформаторы напряжения (ТН), трансформаторы тока (ТТ) или посредством электростатической и/или электромагнитной индукции.

Обычный ток молнии характеризуется быстрым нарастанием, за которым следует медленный спад. Продолжительность возрастания типичного сигнала

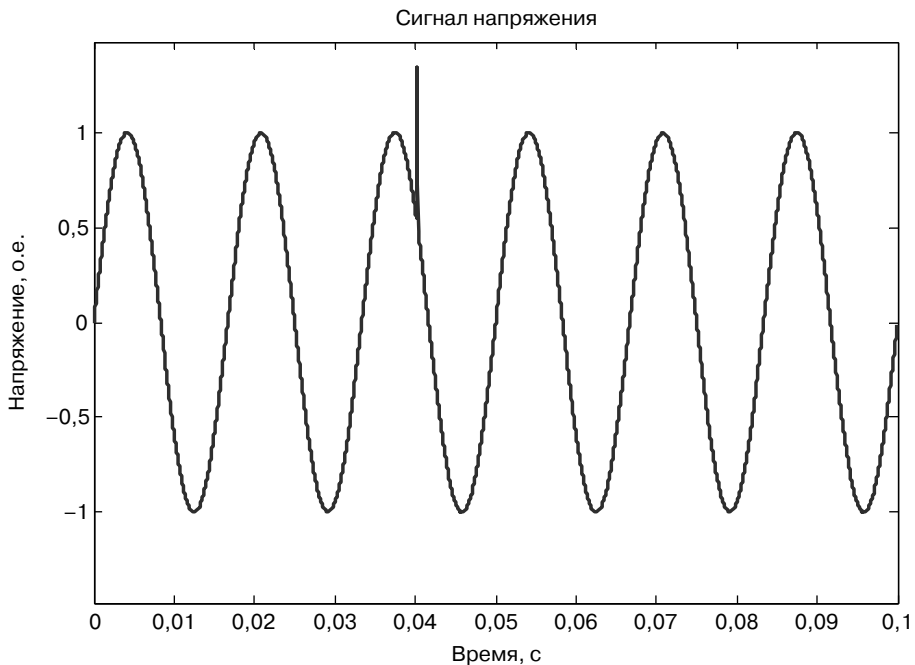


Рис. 2.4. Скачок напряжения от удара молнии

равна 1,2 мкс, а спад — 50 мкс. Такой сигнал можно сгенерировать в условии высоковольтной лаборатории, чтобы испытать оборудование на устойчивость к атмосферному электричеству. Форма сигнала, показанного на рис. 2.3, может быть представлена уравнением:

$$v(t) = V_0(e^{-t/t_b} - e^{-t/t_a}), \quad (2.1)$$

где V_0 — напряжение разряда, t — время, а t_a и t_b — параметры $t_a = 0,2$ мкс, а $t_b = 71$ мкс, время до достижения 30% (точка А на рис. 2,3) и 90% (точка В) от пикового значения, соответственно равны 0,071 мкс, и 1 мкс.

Из-за короткой продолжительности процесса не все электротехническое оборудование заглушается и фиксирует удары молнии по сигналу напряжения. На рис. 2.4 приведен пример такого сигнала напряжения.

2.2.3. Коммутационное перенапряжение

Процедуры замыкания и размыкания в энергосистемах вызывают коммутационное перенапряжение в высоковольтных цепях и их вспомогательных контурах управления.

Коммутационное перенапряжение возникает во множестве различных форм и имеет множество различных источников. Обычно оно связано с изменением рабочего состояния системы, что означает переключение с участием накопленной энергии и ее высвобождением.

Переходные процессы в силовых цепях вызваны переходом от одного состояния к другому, например, при размыкании выключателя. В этот переходный период энергия, запасенная в электромагнитных полях, перераспределяется, вызывая переходные процессы, как показано на рис. 2.5.

Обмен энергией между электрическим и магнитным полями происходит не только на основной частоте (50 или 60 Гц), между связанными полями также будут происходить колебания и на других частотах. Они будут зависеть от включенной в контур индуктивности и емкости.

Угловая частота переходной компоненты определяется уравнением:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}, \quad (2.2)$$

где ω_s — это собственная угловая частота колебаний (рад/с); r — это гасящее сопротивление; L — индуктивность; C — емкость. Если $r = 0$, $\omega_s = \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$.

Для схемы, показанной на рис. 2.6, можно показать, что напряжение на клемме разомкнутого выключателя (V_d) превышает установившееся значение. Оно приблизительно определяется по формуле:

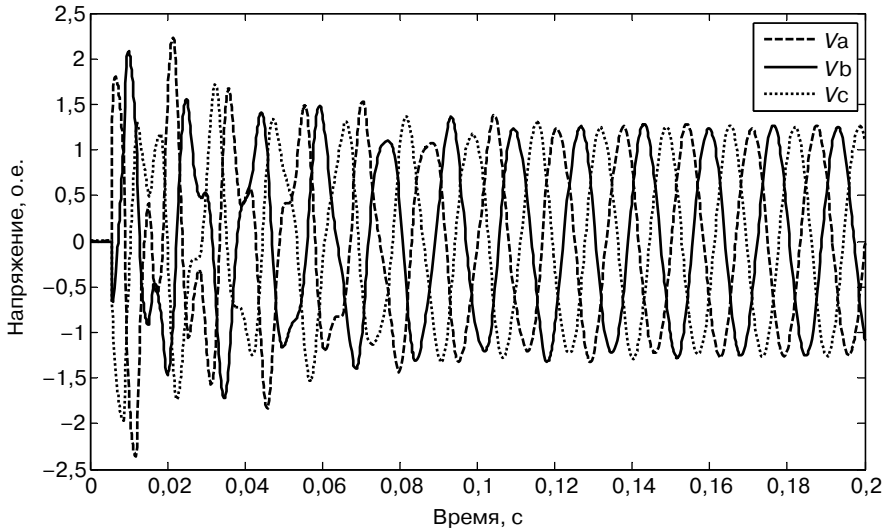


Рис. 2.5. Фазы при включении трехфазной линии электропередачи на 400 кВ: V_a , V_b , и V_c

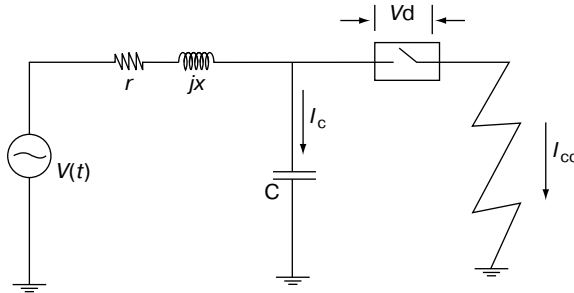


Рис. 2.6. Отключение тока короткого замыкания

$$V_d = V_c = V_M [1 - e^{-t/\tau} \cos(\omega_0 t)], \quad (2.3)$$

где V_c — это напряжение на контактах шунтирующей емкости, а V_M — основная амплитуда источника,

$$V(t) = -V_M \cos(\omega_0 t), \quad (2.4)$$

а τ — постоянная времени контура:

$$\tau = \frac{2L}{r}. \quad (2.5)$$

Составляющая высокочастотного затухающего переходного процесса $V_M = e^{-t/\tau} \cos(\omega_0 t)$ обычно называется переходным напряжением восстановления (TRV — transient recovery voltage). Его максимальное значение ($V_{d,max}$) зависит

от r (гасящее сопротивление) и от частоты (ω_0), а величина лежит в пределах диапазона:

$$V_M < V_{d,\max} < 2V_M. \quad (2.6)$$

Если принять r равным нулю, то мы имеем незатухающий переходный процесс с частотой f_s , определяемой:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (2.7)$$

В этом случае $V_{d,\max} = 2V_M$.

Характеристика переходного восстанавливающегося напряжения V_d показана на рис. 2.7.

Автоматические выключатели оборудованы специальными устройствами, которые минимизируют амплитуду и воздействие этих переходных процессов. Если скорость возрастания TRV в кВ/с превышает скорость нарастания сопротивления или диэлектрической прочности между контактами, то выключатель не сможет удерживать напряжение и произойдет повторный пробой. Повторный пробой определяется величиной проводимости выключателя на текущем полупериоде после успешного прерывания при токе пересечения нуля. Иногда автоматические выключатели устанавливаются специально для переключения критических цепей.

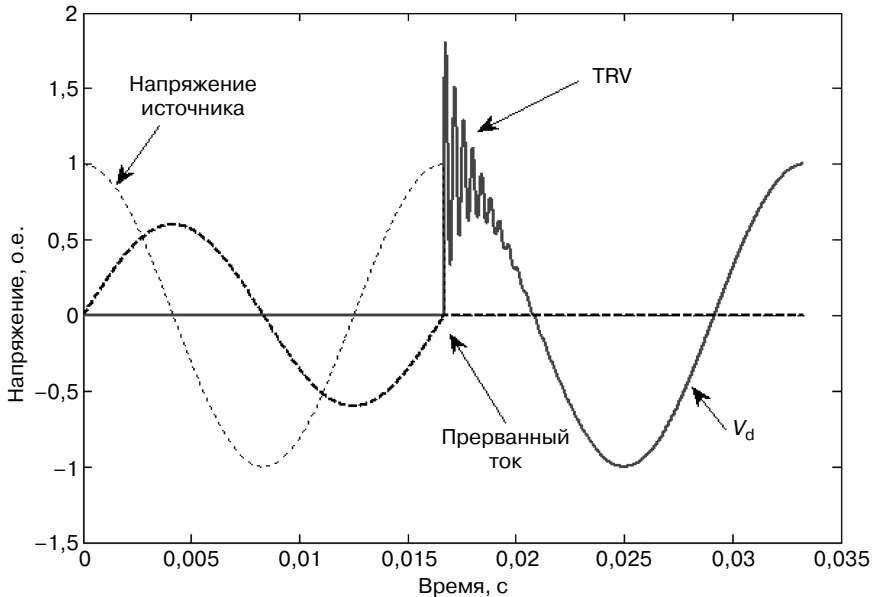


Рис. 2.7. Переходное восстанавливающееся напряжение на контактах размыкателя цепи, когда $r \neq 0$

2.2.4. Переключения батарей конденсаторов

Обычным методом повышения коэффициента мощности и профиля напряжения на всех уровнях напряжения электрической энергосистемы является установка шунтирующих конденсаторов. Эти шунтирующие батареи конденсаторов включаются и выключаются по необходимости. Коммутационные процедуры включают в себя зарядку, разрядку, отключение тока короткого замыкания, повторное включение и зарядку батареи конденсаторов в то время, когда другая батарея уже находится в работе. Последняя процедура также известна, как встречно-параллельное подключение.

При включении батареи конденсаторов все ранее упомянутые действия могут вызвать значительные переходные процессы в сигналах тока и напряжения. Переходные характеристики зависят от комбинации механизма инициирования и характеристик электрической цепи в источнике переходного процесса. Колебательный характер переходных процессов обусловлен индуктивностью и емкостью контура.

2.2.4.1. Зарядка

Зарядка батареи шунтирующих конденсаторов происходит преимущественно через индуктивный источник, что приводит к возникновению осциллирующего переходного процесса, напряжение которого может достигать удвоенного нормального амплитудного значения напряжения системы (V_{pk}).

На рис. 2.8 показана упрощенная эквивалентная система переходного процесса от зарядки. Характерная частота f_s этого переходного процесса определяется уравнением:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \approx f_0 \sqrt{\frac{X_C}{X_S}} \approx f_0 \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{MVA_r}}. \quad (2.8)$$

Пиковый пусковой ток (I_{pk}) определяется по формуле:

$$I_{pk} = \frac{V_{pk}}{Z_S}, \quad Z_S = \sqrt{\frac{L_s}{C}}, \quad (2.9)$$

где f_s — это характеристическая частота (Гц); L_s — это индуктивность источника прямой последовательности (Г); C — это емкость батареи конденсаторов (Ф); f_0 — это частота системы (50 или 60 Гц); X_S — это реактивное сопротивление источника прямой последовательности (Ом); X_C — это емкостное реактивное сопротивление батареи конденсаторов (Ом); MVA_{sc} — это мощность трехфазного короткого замыкания (МВА); MVA_r — это номинальная мощность трехфазной батареи конденсаторов; V_{pk} — это пиковое напряжение шины между линией и заземлением (B); а Z_S — это характеристическое полное сопротивление (Ом).

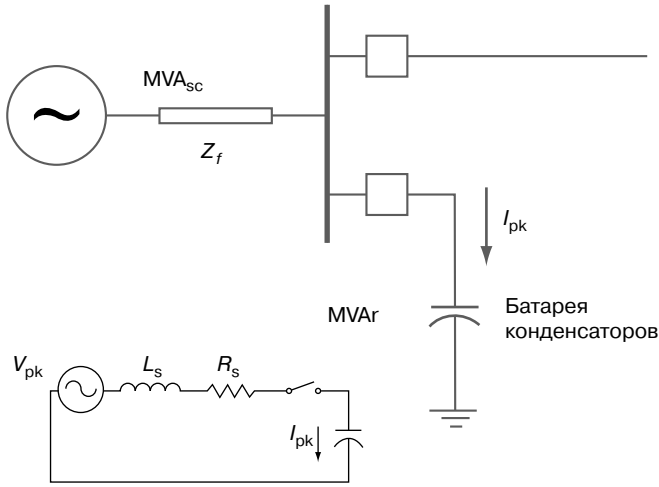


Рис. 2.8. Системное представление батареи конденсаторов

Поскольку напряжение конденсатора не может измениться мгновенно, начало заряда батареи конденсаторов приводит к немедленному падению напряжения системы. За этим следует возникновение колебательного переходного напряжения, наложенного на частоту основного сигнала. Пиковая величина напряжения зависит от положения переходного процесса (то есть момента начала зарядки) и при худшем сценарии может достигать удвоенного нормального напряжения системы (V_{pk} о.е.).

Тем не менее в реальной системе переходные амплитуды меньше теоретических, что обусловлено наличием системных потерь, нагрузок и других демпфирующих элементов. Обычно фактические уровни амплитуды напряжения

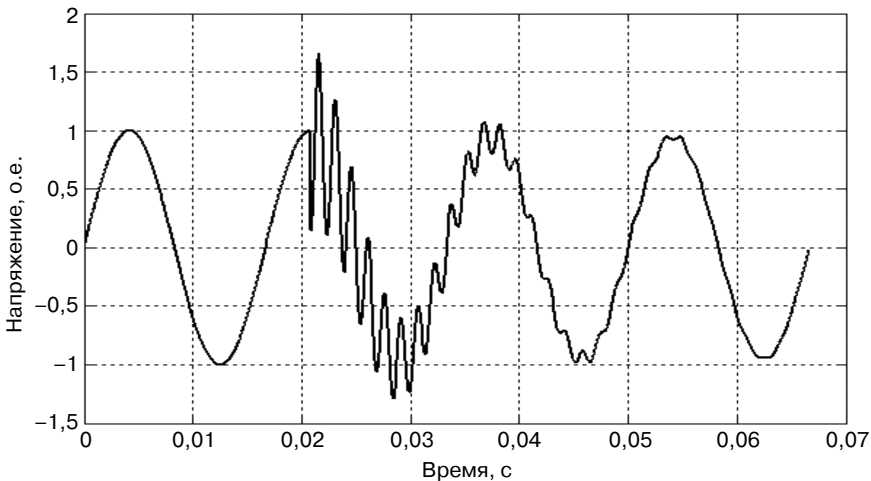


Рис. 2.9. Переходное напряжение при зарядке конденсатора

изменяются от 1,2 до 1,8 раз, а частоты переходного процесса лежат в пределах 300–1000 Гц. На рис. 2.9 показаны колебания напряжения во время заряда батареи конденсаторов, полученные в результате моделирования. На рис. 2.10 показаны сигналы с регистраторов аварийных событий (РАС). Следует отметить, что частота переходного напряжения совпадает с частотой пускового тока конденсатора.

Как правило, службы энергоснабжения не сильно обеспокоены защитой от переходных перенапряжений. Это связано с тем, что разряды обычно ниже начального уровня изоляции. Однако в связи с их частотным диапазоном эти переходные сигналы могут проходить через понижающие трансформаторы прямо к промышленным и коммерческим нагрузкам. Таким образом, они могут создавать проблемы или привести к повреждению оборудования.

Обычно во вторичном контуре переходные процессы от подключения конденсаторов являются функцией от коэффициента трансформации понижающего трансформатора. Если эксплуатирующая организация использует конденсаторы для коррекции коэффициента мощности в контуре низкого напряжения, то включение конденсаторов в высоковольтном контуре может вызвать сильное перенапряжение. Это будет обусловлено усилением напряжения на низковольтных конденсаторах в удаленных цепях. Как правило, такие перенапряжения повреждают устройства защиты от перенапряжения малой мощности или вызывают отключение силового электронного оборудования. Тем не

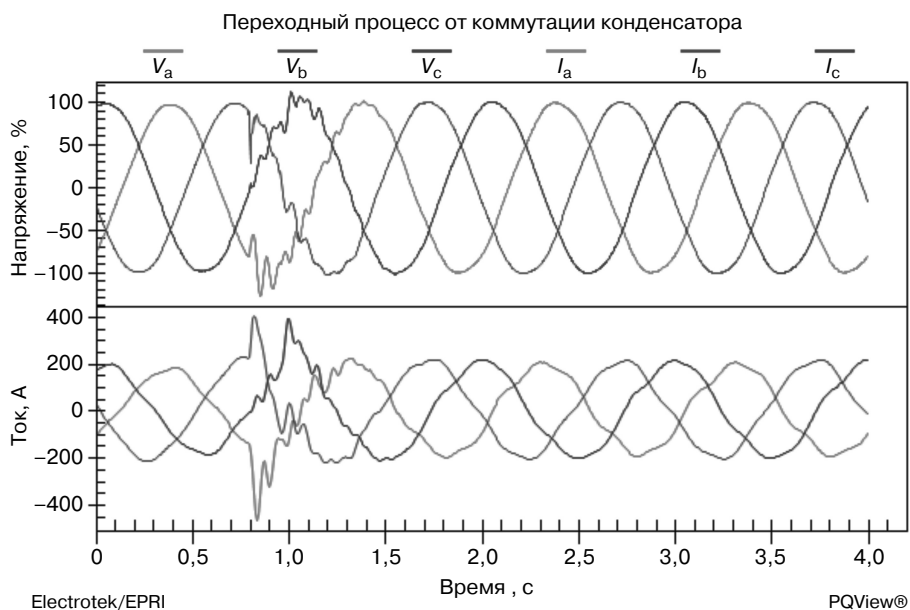


Рис. 2.10. Реальная осциллограмма заряда батареи конденсаторов (источник www.pqview.com)

менее в некоторых случаях сообщалось о полном отказе оборудования конечного пользователя. Для получения основных сведений о проблемах, связанных с увеличением напряжения, см. источник [1].

2.2.4.2. Обесточивание

Когда в определенный момент выключатель цепи переходит в разомкнутое состояние, сигнал напряжения на разомкнутом конце (где установлена батарея конденсаторов) переходит в режим постоянного тока, а электрический заряд сохраняется. Это связано с наличием шунтирующей емкости на конце контура, как показано на рис. 2.11а. Важно понять характер переходного восстанавливающегося напряжения (TRV) на выключателе цепи. Эти сигналы показаны на рис. 2.11б. Следует заметить, что TRV может увеличиваться до двух раз. Если величина TRV превысит максимальное допустимое напряжение выключателя, может возникнуть повторный пробой.

2.2.4.3. Встречно-параллельное подключение батарей конденсаторов

Это явление, как правило, связано с выбросом токов большой амплитуды и с высокими частотами, которые накладываются на основную компоненту. Сегодня наиболее распространенным способом ограничения амплитуды и частоты тока является использование последовательно включенных реакторов с отдельными батареями конденсаторов. Для некоторых типов выключателей или контактов могут также использоваться предустановленные резисторы или индукторы. Для некоторых типов выключателей цепи возможно применить методы синхронного включения. В настоящее время это важно для обеспечения интеллектуальных сетей. При этом стремятся привести каждую фазу трехфазной системы к ее идеальному состоянию, то есть такому, когда напряжение проходит через ноль.

Частота и величина броска тока при встречно-параллельном подключении зависит от емкости уже подключенного конденсатора, сопротивления

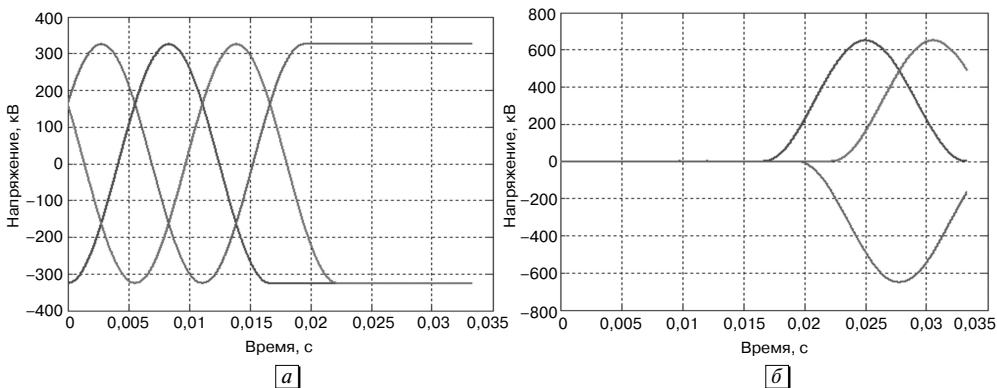


Рис. 2.11. Разрядка батареи конденсаторов: (а) напряжения на конденсаторе; (б) TRV

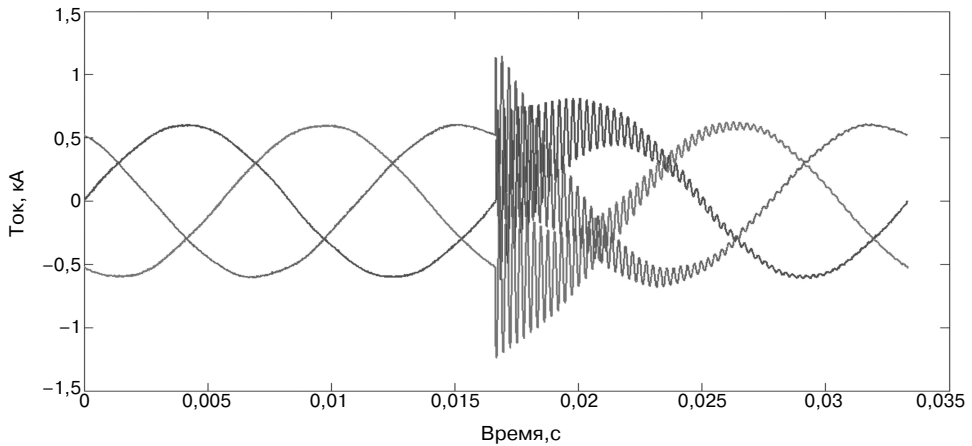


Рис. 2.12. Бросок тока зарядки конденсатора при встречно-параллельном подключении

разрядного контура и мгновенного напряжения на клеммах батареи конденсаторов в момент начала заряда.

Как правило, сопротивление контура намного ниже, чем сопротивление системы. Это приводит к большему броску тока по сравнению с током во время заряда изолированной батареи. На рис. 2.12 показан бросок тока во время заряда при встречно-параллельном подключении, который характеризуется наличием высокочастотных компонент.

Хотя высокочастотные компоненты присутствуют на протяжении всего лишь нескольких миллисекунд, они могут превысить максимально допустимую мгновенную переходную частотную характеристику коммутационного устройства. Это также может вызвать оплавление предохранителей, ложное срабатывание защитных реле и чрезмерные погрешности в работе трансформаторов тока, подключенных к питающим кабелям батарей конденсаторов, соединенных «звездой» с заземленной нейтралью.

2.3. Ток короткого замыкания и компонента постоянного тока

Среди всех элементов энергосистемы линии электропередачи и распределенные сети наиболее подвержены условиям окружающей среды. Дождь, ветер, молнии, пожары, переносимые ветром объекты, птицы и самолеты относятся к числу факторов, которые могут повлиять на работу распределительной сети или линии электропередачи. При возникновении пробоя изоляции между проводниками может образоваться путь для аварийного тока. Ток, как правило, протекает через область низкого сопротивления, минуя остальную цепь. При этом