

ОГЛАВЛЕНИЕ

Об авторах	10
Благодарности	11
Предисловие	12
Глава 1. ВВЕДЕНИЕ	13
1.1. История вопроса	13
1.2. Идеальная форма напряжения	14
1.3. Нелинейная нагрузка. Выпрямитель	15
1.4. Качество электроэнергии. Определения	18
1.4.1. Примеры плохого качества электроэнергии	18
1.4.2. Необходимость коррекции качества электроэнергии	20
1.5. О чем эта книга	21
1.6. Комментарий к списку литературы	22
Список литературы.	23
Глава 2. СТАНДАРТЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.	27
2.1. Стандарты IEEE 519 и 1159	27
2.2. Стандарт ANSI C84.	29
2.3. Кривые СВЕМА и ITIC	30
2.4. Стандарты на излучение высокочастотных помех.	32
Заключение	35
Список литературы.	36
Глава 3. ИСКАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ	37
3.1. Провалы напряжения	37
3.2. Выбросы напряжения	41
3.3. Импульсная помеха	42
3.4. Осциллирующая помеха.	44
3.5. Прерывание напряжения	46
3.6. Просечки напряжения.	46
3.7. Флуктуации напряжения и фликер-эффект	48

3.8. Разбалансировка напряжений	51
Заключение	52
Список литературы.	53
Глава 4. ГАРМОНИКИ СЕТЕВОЙ ЧАСТОТЫ	54
4.1. Введение	54
4.2. Периодические сигналы и гармоники.	54
4.2.1. Среднеквадратичное значение	58
4.2.2. Постоянный ток	58
4.2.3. Чистая синусоида	59
4.2.4. Последовательность прямоугольных импульсов	59
4.2.5. Постоянный ток с пульсациями	60
4.2.6. Импульсы треугольного тока	60
4.2.7. Однополярные прямоугольные импульсы	60
4.2.8. Однополярные импульсы с наклонной вершиной.	61
4.2.9. Однополярные треугольные импульсы	62
4.3. Суммирование гармоник	62
4.4. Коэффициент нелинейных искажений	62
4.5. Коэффициент формы	63
Заключение	69
Список литературы.	69
Глава 5. ИСТОЧНИКИ ГАРМОНИК ТОКА.	70
5.1. Введение	70
5.2. Однофазные выпрямители	71
5.3. Трехфазные выпрямители.	75
5.3.1. Шестипульсационный выпрямитель.	75
5.3.2. Двенадцатипульсационный выпрямитель.	77
5.4. Высокочастотные пускорегулирующие аппараты для люминесцентных ламп.	77
5.5. Трансформаторы	78
5.6. Другие системы, вызывающие искажения в потребляемом токе	79
Заключение	80
Список литературы.	80
Глава 6. ФИЛЬТРАЦИЯ ГАРМОНИК	81
6.1. Введение	81
6.2. Типовая схема распределительной сети	82
6.3. Стандарт IEEE Std. 519-1992	83
6.3.1. Реакторы	85
6.3.2. Шунтирующие пассивные фильтры	87
6.3.3. Многосекционные фильтры.	90
6.4. Практические аспекты использования пассивных фильтров	95
6.4.1. Активные фильтры гармоник	97
6.4.2. Гибридные фильтры.	98
Заключение	99
Список литературы.	99

Глава 7. ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ	101
7.1. История вопроса	101
7.2. Импульсные источники питания	101
7.2.1. Формы напряжений и токов в DC/DC-преобразователе и генерация высокочастотных помех	105
7.2.2. Испытания на кондуктивные радиопомехи	107
7.2.3. Меры по уменьшению кондуктивных помех	108
Заключение	109
Список литературы	109
Глава 8. МЕТОДЫ ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ НИЗКОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	110
8.1. Введение	110
8.2. Методы коррекции	111
8.2.1. Возмущения напряжения и методы борьбы с ними	112
8.2.2. Надежность	114
8.2.3. Конструирование оборудования, потребляющего электроэнергию	115
8.2.4. Конструирование систем электроснабжения	117
8.2.5. Фильтры гармоник	119
8.2.6. Динамические компенсаторы напряжения	119
8.2.7. Источники бесперебойного питания	120
8.2.8. Трансформаторы	121
8.2.9. Резервные системы электроснабжения	125
Заключение	126
Список литературы	126
Глава 9. ИСТОЧНИКИ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ	128
9.1. Введение	128
9.2. Историческая справка	130
9.3. Классификация ИБП	132
9.3.1. ИБП гражданского назначения	132
9.3.2. Накопители электроэнергии	135
9.3.3. Аккумуляторные батареи	135
9.3.4. Маховики	136
9.3.5. Топливные элементы	139
9.3.6. Ионисторы	140
Заключение	142
Список литературы	142
Глава 10. ДИНАМИЧЕСКИЕ КОМПЕНСАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ	144
10.1. Введение	144
10.2. Принцип работы	145
10.2.1. Работа компенсаторов напряжения и кривые ITIC	147
10.2.2. Обнаружение возмущений напряжения и схемы управления	149
10.2.3. Коммерческие компенсаторы напряжения	150
Заключение	151
Список литературы	151

Глава 11. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ К ВОЗМУЩЕНИЯМ В ЦЕПЯХ ПИТАНИЯ	152
11.1. Введение	152
11.2. Персональные компьютеры.	153
11.2.1. Персональные компьютеры и качество электроэнергии	155
11.2.2. Виды нарушений функционирования ПК	157
11.2.3. Чувствительность ПК к провалам и прерываниям напряжения питания	157
11.2.4. Меры по преодолению воздействия возмущений в напряжении сети на ПК	159
11.2.5. Меры по преодолению воздействия возмущений в напряжении сети на контроллеры	161
11.2.6. Контактторы и реле переменного тока	161
11.2.7. Работа контакторов и реле	162
11.3. Работа контакторов и реле	164
11.4. Повышение устойчивости контакторов к возмущениям напряжения управления.	165
Заключение	166
Список литературы.	166
Глава 12. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ	168
12.1. Электрические двигатели	168
12.2. Асинхронные электродвигатели	168
12.2.1. Опасности	169
12.2.2. Явления.	169
12.2.3. Защита	171
12.3. Драйверы электродвигателей с регулируемой скоростью вращения	172
12.3.1. Применение	173
12.3.2. Возмущения напряжения	174
12.3.3. Разбаланс напряжений	176
12.3.4. Методы защиты драйверов электродвигателей	177
Заключение	183
Список литературы.	183
Глава 13. РЕЗЕРВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	185
13.1. Конструирование резервных систем электроснабжения	185
13.2. Компоненты систем резервного электроснабжения	186
13.3. Примеры систем резервного электроснабжения	187
13.4. Мотор-генераторные установки	190
13.4.1. Стандарты	191
13.4.2. Компоненты мотор-генераторных установок.	192
13.4.3. Работа мотор-генераторных установок	193
13.4.4. Передаточные ключи	194
Заключение	196
Список литературы.	196

Глава 14. ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	197
14.1. Мультиметры	197
14.2. Осциллографы	198
14.3. Токовые пробники	199
14.4. Измерительная катушка	200
14.5. Специальные приборы для измерения параметров качества электроэнергии	200
14.6. Токовый трансформатор в деталях.	202
Заключение	207
Список литературы.	208
Приложение I. ГОСТ 13109-97	
Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения	209
Приложение II. ГОСТ Р 51320-99	
Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств — источников промышленных радиопомех	246
Приложение III. ГОСТ Р 51318.14.1-2006(СИСПР 14-1:2005)	
Совместимость технических средств электромагнитная. Бытовые приборы, электрические инструменты и аналогичные устройства. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений	269
Предметный указатель	331

Об авторах

Александр Куско, доктор естественных наук (Sc.D.) и профессиональный инженер, является вице-президентом корпорации Exponent. Ранее он был адъюнкт-профессором инженерного отделения Массачусетского технологического института (MIT). Доктор Куско является действительным членом IEEE и работал в комитете по разработке стандарта IEEE Std. 519-1981, касающегося ограничения гармоник в силовых электрических системах.

Марк Т. Томпсон, доктор философии (Ph.D.), является президентом инженерно-консультационной фирмы Thompson Consulting, Inc., специализирующейся в области силовой электроники, конструирования магнитных и аналоговых цепей и систем. Он также является адъюнкт-профессором по электротехнике в Ворчестерском политехническом институте и членом добровольной пожарной дружины в Гарварде (штат Массачусетс).

Предисловие

Эта книга предназначена как практикующим инженерам, так и менеджерам в области силовой электроники, интересующимся вопросами качества электроэнергии в электрических системах. Благодаря собственному опыту и на основе изучения большого числа публикаций, у нас сложилась система реальных взглядов на разные аспекты проблемы качества электроэнергии, которыми мы и делимся с читателями.

В этой вводной главе мы попытаемся дать определение термину «качество электроэнергии» и затем обсудим причины, приводящие к ухудшению качества электроэнергии. К этим причинам относятся аварии в электросетях, грозовые разряды и другие события, неблагоприятно влияющие на форму напряжения и (или) тока в сети электроснабжения.

1.1. История вопроса

В последнее время все большее внимание уделяется качеству электроэнергии, поставляемой заводам, торговым заведениям и жилому сектору [1.1...1.15]. В первую очередь это связано с увеличением числа устройств и систем, создающих при работе в токе их потребления гармоники сетевой частоты. Приводы электродвигателей с регулируемой скоростью вращения, импульсные источники питания, электродуговые печи, пускорегулирующие аппараты для питания люминесцентных ламп и множество других устройств создают высокое содержание гармоник в токе, который должны поставлять электросети [1.15...1.17]. Срабатывания рубильников и аварийных выключателей у потребителей добавляют помехи, ухудшающие качество поставляемой электроэнергии. Применительно к этому комплексу вопросов *Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ИЕЭЭ)* провел большую работу по определению, обнаружению и уменьшению факторов, влияющих на качество электроэнергии [1.18...1.27].

Значительная часть используемого в настоящее время оборудования восприимчива к плохому качеству электроэнергии. При этом возможно не только нарушение работоспособности оборудования, но и его повреждение [1.28]. Пожалуй, каждый из пользователей компьютеров сталкивался с их внезапной несанкционированной перезагрузкой, при которой терялись результаты несохраненной работы. Зачастую это связано с низким качеством электропитания в электросети. Как мы увидим далее, плохое качество электроэнергии отрицательно влияет на эффективность работы множества электроприборов и другого оборудования на заводах и в конторах [1.29...1.30].

Множество организаций здравоохранения занималось изучением влияния магнитных и электрических полей на здоровье людей. В результате проведенных исследований были разработаны руководства по ограничению уровней этих полей [1.31]. Так как магнитные поля создаются протекающими через проводники

токами, их уменьшение возможно за счет снижения уровня содержания в этих токах гармоник.

Численная оценка «загрязненности» линии электроснабжения гармониками определяется суммарным коэффициентом гармоник (подробнее см. в гл. 4). Высокий уровень содержания гармоник отрицательно влияет на заводские распределительные сети и может приводить к перегреву электродвигателей, вызывающему сокращение их долговечности. Нагрев ухудшает качество изоляционных материалов, что чревато их пробоем. Нагрев практически любого оборудования сопровождается увеличением риска сбоев его функционирования и вероятности преждевременных отказов. Кроме того, гармоники в сети питания могут вызывать сбои в работе компьютеров и создавать помехи при работе чувствительных аналоговых цепей.

Можно указать следующие основные причины, вызывающие повышенный интерес к проблеме качества электроэнергии [1.32]:

- Измерительная техника: плохое качество электроэнергии может влиять на точность электроизмерений.
- Защитные реле: плохое качество электроэнергии может приводить к нарушению функционирования.
- Сокращение долговечности электрооборудования: плохое качество электроэнергии может повлечь за собой сокращение долговечности и (или) повреждение электрооборудования, что сопровождается производственными потерями.
- Затраты: плохое качество электроэнергии может привести к увеличению производственных издержек вследствие упомянутых выше причин.
- Электромагнитная совместимость: плохое качество электроэнергии может создать проблемы при совместной работе различных электроустановок [1.33...1.39].

1.2. Идеальная форма напряжения

Идеальная форма напряжения, поставляемого нагрузкам из электросети с идеальным качеством, показана в однофазном случае на **Рис. 1.1**, а в трехфазном — на **Рис. 1.2**. При этом амплитуда, частота и любые отклонения от этих форм должны находиться в пределах предписанных ограничений.

Когда напряжения, показанные на **Рис. 1.1** и **Рис. 1.2**, прикладывают к электрическим нагрузкам, токи в них по частоте и амплитуде оказываются зависимыми от импеданса и других характеристик нагрузок. Если форма тока в нагрузке оказывается синусоидальной, то нагрузку называют линейной. Если же форма тока нагрузки искажена, то такую нагрузку называют нелинейной. Несинусоидальный ток нагрузки может исказить и напряжение в системе электропитания, что является показателем плохого качества электроэнергии.

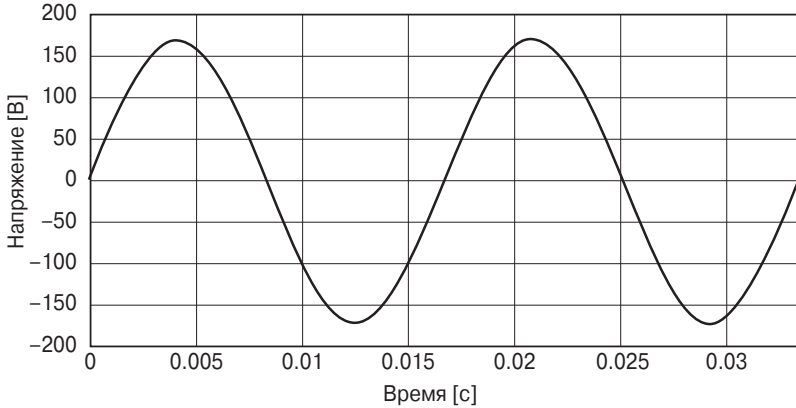


Рис. 1.1. Идеальная форма однофазного напряжения. (Амплитуда 170 В, среднееквадратичное (эффективное) значение 120 В, частота 60 Гц.)

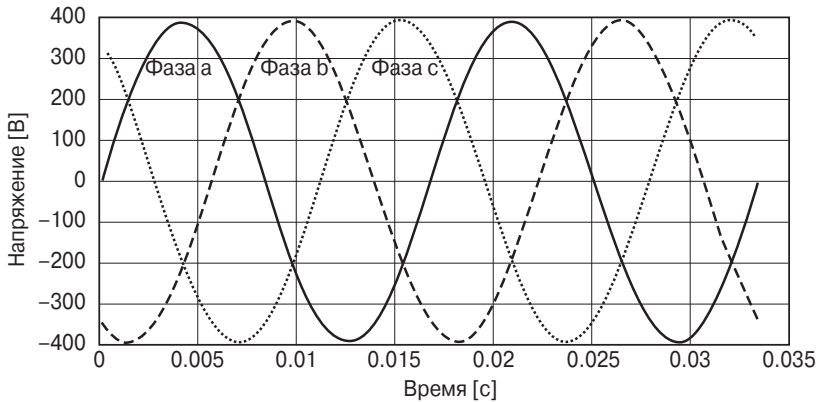


Рис. 1.2. Идеальная форма трехфазного напряжения на частоте 60 Гц при линейном напряжении 480 В. Показанные графики соответствуют напряжению между фазой и нейтралью. Эффективное напряжение фаза-нейтраль равно $480 / \sqrt{3} = 277$ В. Таким образом, амплитуда напряжения фаза-нейтраль равна $277 \times \sqrt{2} = 392$ В

1.3. Нелинейная нагрузка. Выпрямитель

Выпрямитель, служащий для преобразования переменного тока в постоянный, является наиболее распространенным видом нелинейной нагрузки в электрических системах. Диапазон мощностей выпрямителей простирается от 100 Вт в персональных компьютерах до 10 000 кВт в системах регулировки скорости вращения электродвигателей. Электрическая схема *трехфазного выпрямителя* приведена на **Рис. 1.3а**. Каждый из шести диодов в идеальном случае проводит ток в течение 120° периода длительностью 360° . Нагрузка здесь представлена в виде источника тока, который поддерживает ток нагрузки I_L на постоянном уровне, с помощью, например, идеального дросселя. Источник питания подает на вход выпрямителя напряжения, приведенные на **Рис. 1.2**. Получающийся при этом ток в одной из

фаз показан на **Рис. 1.3б**. Ток в этом случае очень сильно искажен по сравнению с синусоидой, и эти искажения тока могут вызвать искажения и напряжения в питающей выпрямитель цепи.

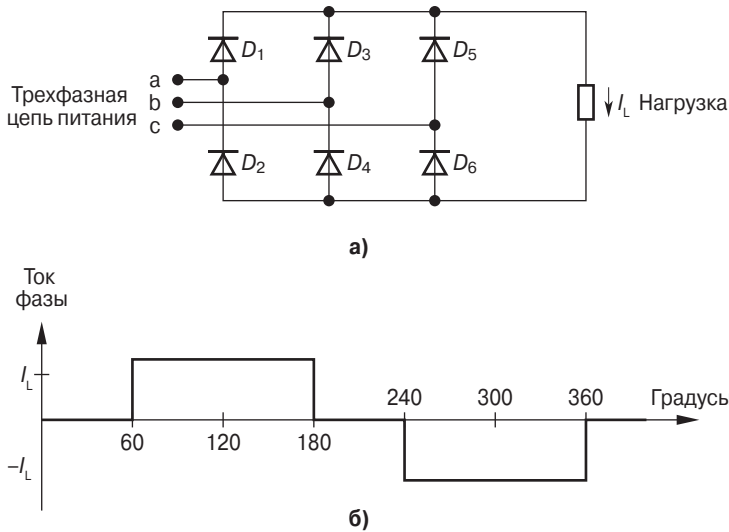


Рис. 1.3. Трехфазный мостовой выпрямитель: а) схема; б) ток в фазном проводе при постоянном токе в нагрузке.

Как еще будет обсуждаться в гл. 4, ток в форме прямоугольных импульсов можно разложить на составляющие его гармоники с помощью *рядов Фурье*. В случае трехфазного выпрямителя (называемого еще 6-пульсационным) его компонентами является основная частота питающей сети и ее гармоники с номерами 5, 7, 11, 13 и т. д. Гармоники с номерами, кратными 3, в этом спектре отсутствуют. При проведении анализа качества электроэнергии ток каждой гармоники рассматривается независимо от других.

Стандарт IEEE 519-1992, введенный в 1981 г. и обновленный в 1992 г., содержит практические рекомендации по контролю гармоник в электрических системах [1.21]. Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике также выпустил стандарт IEEE 1159-1995, который описывает рекомендованные методы измерения и контроля качества электроэнергии [1.23].

С течением времени используется все больше и больше оборудования, создающего гармоники сетевой частоты в системах питания. И с другой стороны, появляется все больше и больше оборудования, чувствительного к воздействию этих гармоник. Из-за влияния гармоник компьютеры, коммуникационное оборудование и другие электрические приборы становятся склонными к сбоям в работе и снижению эффективности.

В частности, в электрических двигателях гармонические токи вызывают увеличение потерь в магнитопроводах и обмотках. (Потери в обмотках растут из-за проявления скин-эффекта, а потери в магнитопроводах — из-за вихревых токов и гистерезиса.) Все это приводит к перегреву обмоток и магнитопровода, пульсациям вращающего момента и снижению КПД двигателя. Гармоники приводят к

увеличению шумов, создаваемых двигателями и трансформаторами, и могут возбуждать механический резонанс в электродвигателях и их нагрузках. (IEEE Std. C57.12.00-1987 рекомендует для трансформаторов использовать коэффициент искажения тока не более 5%.)

Гармоники напряжений и токов могут вызывать ложные срабатывания автоматических выключателей и *прерывателей тока при электрическом замыкании на землю* (ground fault circuit interrupter — GFCI), которые широко используются для локальной защиты систем потребления электроэнергии. Эти ложные срабатывания, сопровождающиеся отключением электроэнергии, доставляют большие неприятности пользователям.

Точность измерительных инструментов также страдает от воздействия гармоник, при этом ошибка может оказаться как в одну, так и в другую стороны.

Высокочастотные импульсные устройства, такие как импульсные источники питания, схемы коррекции коэффициента мощности и управления скоростью вращения электродвигателей, создают в цепях питания *высокочастотные помехи*, не связанные с гармониками сетевого напряжения. Например, импульсный источник питания с рабочей частотой 75 кГц возбуждает набор гармонических помех с частотами, кратными 75 кГц (**Рис. 1.4**). В мире существует множество стандартов, в которых даны определения высокочастотных помех, возбуждаемых в цепях электропитания теми или иными устройствами, и нормированы их уровни. Например, в *стандарте IEC-1000-2-1* [1.40] эти помехи определены следующим образом:

«Между гармониками напряжения и тока сетевой частоты могут наблюдаться другие частоты, которые не кратны сетевой частоте. Они могут появляться как дискретные частоты и как сплошной широкополосный спектр».

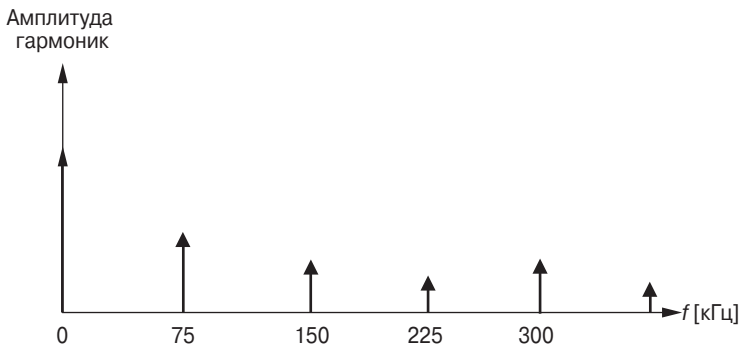


Рис. 1.4. Типичный спектр радиопомех, создаваемых в цепях питания импульсного источника питания с рабочей частотой 75 кГц. Все гармоники имеют частоту, кратную 75 кГц.

Другими источниками высокочастотных помех являются циклоконвертеры, электродуговые печи и другие нагрузки, работающие не синхронно с частотой питающей сети [1.41].

Высокочастотные помехи могут излучаться в форме радиопомех и воздействовать на находящиеся неподалеку от источника помех другие электронные устройства. Медицинское оборудование особенно подвержено воздействию радиопомех ввиду низкого уровня сигналов, с которыми оно работает. Телефонные линии связи также могут страдать из-за наводимых в них помех.

Таким образом, необходимость поставки потребителям «чистой» электрической энергии явилась основой для появления новой области техники — обеспечения качества электроэнергии.

1.4. Качество электроэнергии. Определения

Обеспечение *качества электроэнергии*, в вольном определении, является наукой о конструировании цепей питания и заземления, обеспечивающим надежность электропитания тех или иных систем. В *стандарте IEEE 1159* (раздел 3.1.47, с. 5) обеспечение качества электроэнергии определяется как «концепция конструирования цепей питания и заземления в чувствительном оборудовании так, как это подходит для работы данного оборудования» [1.23].

В авторитетном словаре терминов *IEEE 100* [1.42] обеспечение качества электроэнергии определяется как «концепция конструирования цепей питания и заземления в электронном оборудовании так, как это подходит для работы данного оборудования и совместимо с используемой системой питания и другим соединенным с ней оборудованием».

В столь же известном справочнике стандартов для инженеров-электротехников (14-е издание, 2000 г.) [1.43] отмечено, что «хорошему качеству электроэнергии не так-то просто дать определение, потому что электроэнергия хорошего качества для электродвигателя в холодильной установке может оказаться недостаточно хороша для современных персональных компьютеров и других чувствительных приборов. Например, кратковременный перебой в подаче электроэнергии не скажется заметно на работе электродвигателей и систем освещения, но может вызвать большие неприятности для цифровых часов, видеомагнитофонов и т. д.».

1.4.1. Примеры плохого качества электроэнергии

Плохое качество электроэнергии обычно определяется как степень отклонения формы напряжения от идеальной, показанной на **Рис. 1.1**. На **Рис. 1.5** приведено несколько примеров типичных возмущений¹⁾ в сетях электроснабжения, приводящих к ухудшению качества электроэнергии. Эти возмущения наблюдаются на практике, могут быть рассчитаны и созданы с помощью испытательного оборудования.

Далее приведены некоторые определения, принятые IEEE²⁾.

¹⁾ Термином «возмущение» (калька с англ. disturbance) в этой книге обозначены все проявления отклонения сетевого напряжения от номинального по форме, амплитуде и частоте. Он объединяет такие явления, как кондуктивные высокочастотные и импульсные помехи, динамические изменения напряжения, фликер-эффект, гармоники тока и напряжения. — *Примеч. пер.*

²⁾ В нашей стране терминология несколько иная. Она отражена, например, в ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» (см. прилож. I). — *Примеч. пер.*

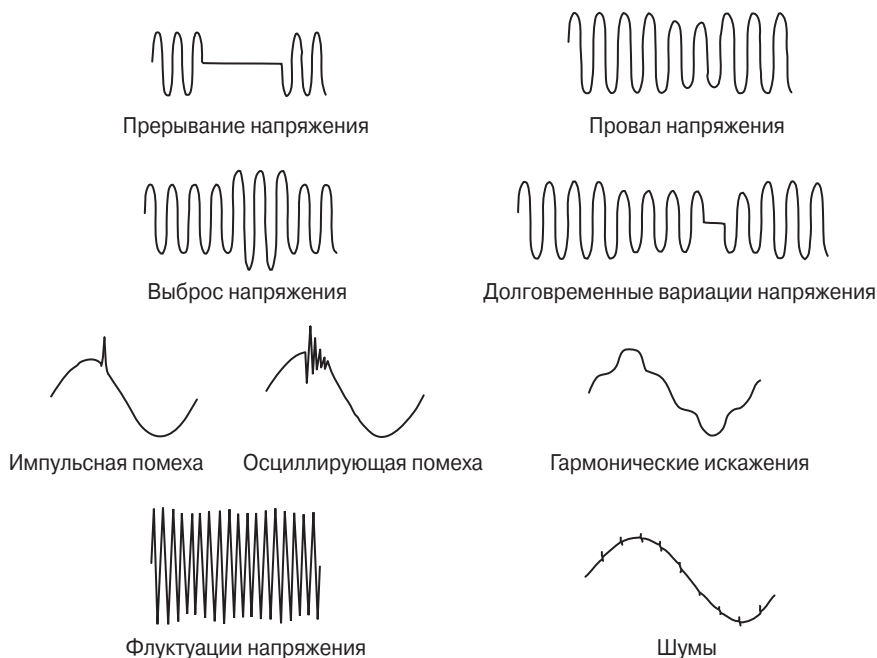


Рис. 1.5. Типичные возмущения в сетях электропитания [1.2].
(Перепечатано с разрешения IEEE, 1997 г.)

- **Провалом напряжения питания** называется кратковременное уменьшение его среднеквадратичного значения в пределах 10...90% от номинальной величины. Длительность провала может составлять от полупериода до 1 минуты [1.44...1.50]. Обычно причинами провалов напряжения являются включение больших электродвигателей и аварии в сетях электроснабжения.
- **Выброс напряжения** — это кратковременное увеличение его среднеквадратичного значения в пределах 110...180% от номинальной величины продолжительностью от полупериода до 1 минуты. Причинами провалов являются аварии в сетях электроснабжения и неправильное подключение выводов понижающих трансформаторов на электрических подстанциях.
- **Импульсная помеха** представляет собой кратковременное однополярное изменение напряжения, тока или и того, и другого в линии электропередачи. Чаще всего причинами возникновения импульсных помех являются грозовые разряды, коммутация индуктивных нагрузок и систем электроснабжения. Импульсные помехи большой величины могут приводить к сбоям в работе оборудования и даже к его повреждению. Влияние импульсных помех может быть уменьшено с помощью таких ограничителей напряжения, как *стабилитроны* и *металлооксидные варисторы*.
- **Осциллирующая помеха** представляет собой кратковременное двухполярное изменение напряжения, тока или и того, и другого в линии электропередачи. Эта помеха может возникать из-за включения конденсаторов, предна-

значенных для коррекции коэффициента мощности или феррорезонанса в трансформаторах.

- **Прерывание** определяется как уменьшение напряжения или тока в сети ниже 10% от номинального значения, по длительности не превышающее 60 с.
- **Просечки напряжения** возникают из-за коммутации диодов в выпрямителях с конечной индуктивностью линии электропитания.
- **Флуктуации напряжения** с относительно небольшим (менее $\pm 5\%$) изменением среднеквадратичного значения. Их вызывает работа циклоконвертеров, электродуговых печей и других систем, в которых ток потребления не синхронизирован с сетевой частотой [1.51...1.61]. Такие флуктуации могут привести к заметному на глаз мерцанию осветительных приборов.
- **Разбаланс напряжений в трехфазной сети**, сопровождающийся возникновением различий амплитуд линейных напряжений относительно друг друга.

1.4.2. Необходимость коррекции качества электроэнергии

Так почему же так важно обнаруживать и (или) устранять факторы, ухудшающие качество электроэнергии [1.63, 1.64]? Главной причиной этого является желание конечного пользователя иметь бесперебойную поставку энергии хорошего качества, так как цена простоя производства весьма велика. В **Табл. 1.1** приведен перечень оборудования, применяющегося для борьбы с плохим качеством электроэнергии, и сравнительные цены.

Таблица 1.1. Сравнительные цены оборудования для подавления возмущений в цепях электропитания

Вид оборудования для подавления возмущений	Область применения	Сравнительные цены
Твердотельные переключатели без разрыва тока	Используются совместно с альтернативным источником электроэнергии. В зависимости от быстродействия могут использоваться для устранения прерываний, провалов, выбросов и длительных чрезмерных повышений и понижений среднего и высокого напряжения	\$300/кВА
Резервные генераторы	Используются для подачи электроэнергии взамен штатной электросети в случаях прерывания поступления электроэнергии от нее. Требуется устройство для переключения	\$260...500/кВА
Источники бесперебойного питания (ИБП)	Используются для устранения прерываний, провалов, выбросов и флуктуаций напряжения. Помогут также в случаях импульсных и осцилляционных помех, длительных чрезмерных повышений и понижений напряжения и шумов	\$1000...3000/кВА
Сверхпроводящие накопители энергии	Энергия накапливается в магнитном поле сверхпроводящей обмотки. Могут использоваться в случаях провалов и прерываний напряжения	\$1000/кВА
Мотор-генератор	Применяется во всех случаях, кроме длительных перерывов в подаче энергии. Мотор приводит в действие генератор с выходом, изолированным от входа	\$600/кВА
Стартеры электродвигателей	Применяются для ограничения пускового броска тока в синхронных и асинхронных электродвигателях и тем самым уменьшения провала напряжения питания	\$25...50/кВА

Таблица 1.1. Сравнительные цены оборудования для подавления возмущений в цепях электропитания (продолжение)

Вид оборудования для подавления возмущений	Область применения	Сравнительные цены
Устройства для увеличения надежности контакторов при провалах электропитания	Обеспечивают увеличение надежности контакторов при провалах электропитания, например, за счет питания их катушек управления постоянным током	\$30/контактор
Феррорезонансные трансформаторы (стабилизаторы)	Путем использования явлений феррорезонанса и насыщения сердечников обеспечивают стабилизацию напряжения при провалах и выбросах	\$400...1500/ кВА
Приборы для подавления бросков напряжения	Предназначены для подавления импульсных помех. Отчасти помогают и для подавления осциллирующих помех	\$50...200/кВА
Изолирующие экранированные трансформаторы	Предназначены для подавления осциллирующих помех. Отчасти помогают и для подавления импульсных помех	\$20...60/кВА
Реакторы (дрессели)	Предназначены для подавления осциллирующих помех	\$15...100/кВА
Специализированные трансформаторы, позволяющие работать при повышенных К-факторах нагрузки ¹⁾	Используются в сетях с большим содержанием гармоник	\$60...100/кВА
Фильтры гармоник	Путем совместного использования реакторов и конденсаторов отфильтровывают гармоники сетевого напряжения	\$75...250/кВА
<i>Волоконно-оптические линии связи, оптоизоляторы</i>	Используются взамен медных сигнальных проводов в условиях высокого уровня шумов	—
Фильтры высоких частот	Пропускают напряжение промышленной частоты и блокируют нежелательные высокие частоты	—

¹⁾ Эти трансформаторы отличаются от стандартных большей устойчивостью к нагреву, вызываемому высшими гармониками тока. Кроме того, специальная конструкция такого трансформатора позволяет свести к минимуму потери на вихревые токи и потери из-за паразитной емкости. — *Примеч. пер.*

1.5. О чем эта книга

В этой книге будут изложены главные аспекты обеспечения качества электроэнергии. Книга состоит из 14 глав:

- Глава 1** «**Введение**», где представлена история вопроса, даны некоторые определения, примеры и краткое содержание книги.
- Глава 2** «**Стандарты качества электроэнергии**», в которой обсуждаются различные стандарты, разработанные как IEEE, так и другими организациями. Рассматриваются как гармонические искажения на частотах, кратных сетевой частоте, так и высокочастотные помехи, создаваемые импульсными источниками питания, инверторами и другими высокочастотными устройствами.
- Глава 3** «**Искажения напряжения**», в которой обсуждаются искажения сетевого напряжения, его причины и последствия.
- Глава 4** «**Гармоники сетевой частоты**», в которой искажения сетевого напряжения и тока описываются количественно с использованием понятий гармоник и рядов Фурье, а также спектров периодических сигналов.

- Глава 5* «**Источники гармоник тока**», где речь идет об оборудовании, создающем гармоники в их токе потребления, которые, в свою очередь, вызывают искажения питающего напряжения.
- Глава 6* «**Фильтрация гармоник**», в которой рассматриваются фильтры, повышающие качество электроэнергии (как пассивные, так и активные).
- Глава 7* «**Импульсные источники питания**», в которой обсуждаются входящие в большинство современных электронных приборов импульсные высокочастотные преобразователи напряжения, создающие высокочастотные помехи.
- Глава 8* «**Методы преодоления появлений низкого качества энергии**», где представлен обзор методов конструирования оборудования и его систем питания, снижающих последствия плохого качества энергии.
- Глава 9* «**Источники бесперебойного питания**», в которой обсуждается широко распространенное оборудование для предотвращения поступления на чувствительные устройства потребителя электроэнергии с плохим качеством.
- Глава 10* «**Динамические компенсаторы напряжения**», в которой описано недорогое оборудование, исключаяющее воздействие кратковременных провалов напряжения на чувствительные приборы.
- Глава 11* «**Чувствительность электрооборудования к возмущениям в цепях питания**», где обсуждается, как именно провалы и прерывания в подаче электроэнергии влияют на персональные компьютеры и другое чувствительное оборудование.
- Глава 12* «**Оборудование для управления электродвигателями**», в которой обсуждается, как силовое трехфазное электронное оборудование портит качество электроэнергии и само страдает от ее низкого качества.
- Глава 13* «**Резервные системы электропитания**», где обсуждаются мотор-генераторы и передаточные ключи, используемые для питания таких критических потребителей электроэнергии, как вычислительные центры.
- Глава 14* «**Измерения показателей качества электроэнергии**», в которой рассмотрены методы и оборудование для выполнения измерений качества электроэнергии.

1.6. Комментарий к списку литературы

Главными задачами инженеров-электриков являются, во-первых, обеспечение непрерывной поставки «чистой» электроэнергии потребителям и, во-вторых, конструирование и производство оборудования, которое бы работало с той энергией, которую оно в действительности получает. А раз так, то практически вся литература по электротехнике, так или иначе, касается вопросов качества электроэнергии. В конце этой главы (как и во всех других главах) приведен перечень полезных ссылок на ряд изданий. А наиболее важными являются следующие:

- «IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications», (The Orange Book), IEEE Std. 446-1995 [1.20].
- «IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems», IEEE Std. 519-1992, revision of IEEE Std. 519-1981 [1.21].