

Библиотека электротехника

В. А. Панфилов

**ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ И
ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

Вниманию специалистов

Вышли в свет следующие выпуски

“Библиотечки электротехника”:

Торопцев Н. Д. **Асинхронные генераторы для автономных электростанций.**

Иноземцев Е. К. **Ремонт асинхронных электродвигателей электростанций.**

Овчаренко Н. И. **Микропроцессорная автоматика синхронных генераторов и компенсаторов.**

Овчинников В. В., Удрис А. П. **Реле РНТ и ДЗТ в схемах дифференциальных защит (Часть 1. Устройство и конструкции; Часть 2. Принципы расчета уставок и техническое обслуживание).**

Александров В. Ф., Езерский В. Г., Захаров О. Г., Малышев В. С. **Цифровые устройства частотной разгрузки.**

Беляев А. В. **Противоаварийная автоматика в узлах нагрузки с мощными синхронными электродвигателями.**

Добрусин Л. А. **Компьютерное моделирование влияния преобразователей на сеть.**

Бажанов С. А., Бажанов А. С. **Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации (части 1 и 2).**

Киреева Э. А., Цирук С. А. **Электроснабжение жилых и общественных зданий.**

Самородов Ю. Н. **Дефекты и неисправности генераторов.**

Иноземцев Е. К. **Ремонт конструктивных узлов турбогенераторов (части 1 и 2).**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **“ПРЕССА РОССИИ”**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Индексы “Библиотечки электротехника”

— приложения к журналу “Энергетик”

88983 — для предприятий и организаций;

88982 — для индивидуальных подписчиков.

Адрес редакции
журнала **“Энергетик”**:
115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.
Телефон (095) 675-19-06
E-mail: energetick@mail.ru

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу “Энергетик”

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 1 (85)

В. А. Панфилов

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Москва

НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”

2006

УДК 621.317.3
ББК 31.221
П 16

Главный редактор журнала “Энергетик” А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

“Библиотечки электротехника”

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*),
Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев,
В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,
Н. В. Лисицын, Л. Г. Мамиконянц, Л. Ф. Плетнев, В. И. Пуляев,
Ю. В. Усачев, М. А. Шабал

Панфилов В. А.

П 16 Основы метрологии и электроизмерительной техники. —
М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2006. — 88 с.; ил. [Библиотечка
электротехника, приложение к журналу “Энергетик”;
Вып. 1 (85)].

В брошюре изложены базовые понятия метрологии и электроизмерительной техники, приведены основные характеристики электрических сигналов и цепей, освещены практические вопросы обработки результатов измерений.

Для электротехнического персонала, инженеров и технологов, занимающихся электрическими измерениями.

ISSN 0013-7278 © НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”, 2006

Предисловие

Электроизмерительная техника в современной жизни занимает важное место. Электрические цепи буквально пронизывают все сферы деятельности человека. Измерение параметров электрических процессов и цепей — весьма часто встречающаяся и одновременно важная и ответственная задача. Подавляющее большинство современных измерительных приборов строятся на принципах электрических измерений (в том числе и измерители неэлектрических величин). Причина широкого распространения электрических измерений — простота и удобство получения, преобразования, передачи энергии и информации, представленных в электрической форме.

В различных отраслях промышленности, энергетики, в жилищно-коммунальном хозяйстве, в быту и других областях используются сотни миллионов различных средств электрических измерений. Этот огромный арсенал требует уважительного и внимательного к себе отношения. Между тем, персонал, обслуживающий измерительное оборудование технологических объектов, иногда пренебрежительно относится к вопросам измерений, недооценивает важность корректных метрологических подходов, не всегда соблюдает детали методик проведения измерений, плохо представляет себе возможности и особенности применения конкретных приборов, порой имеет недостаточно высокую квалификацию. Такое легкомысленное отношение к измерениям может привести к серьезным ошибкам, к нарушениям технологических процессов, и, как результат, к значительным материальным потерям. От грамотной организации, квалифицированного выполнения измерений, правильного выбора и использования средств измерений, верной интерпретации результатов и оценки их достоверности зависит не только эффективность использования технологического оборудования, но и порой безопасность работы персонала и объекта в целом.

В предлагаемом материале с максимальным упрощением изложены базовые, понятия метрологии и электроизмерительной техни-

ки, приведены основные характеристики электрических сигналов и цепей, освещены практические вопросы обработки результатов измерений. Содержатся основные сведения о классических и современных подходах к оценке основных параметров электрических процессов и цепей промышленной частоты 50 Гц с номинальным значением фазных напряжений 220 В.

Данная брошюра может быть полезна как персоналу технологических объектов, постоянно применяющему и обслуживающему стационарную измерительную аппаратуру, так и специалистам, выполняющим экспресс-измерения автономными (переносными) приборами. Основная задача издания — подвести читателя к правильному пониманию возможностей и особенностей применения методов и средств электрических измерений, помочь грамотно использовать их в повседневных технических задачах.

**Замечания и пожелания по брошюре
просим направлять по адресу:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.
Редакция журнала “Энергетик”.**

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

Основные понятия и определения

Термин “*метрология*” образован от греческих слов “*μετρον*” (метрон — мера, измерение) и “*λογος*” (логос — наука, учение). Метрология — это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства, способах достижения требуемой точности (см. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29-99. ГСИ. “Метрология. Основные термины и определения”). В метрологии различают три, направления: *теоретическое* (фундаментальное), *законодательное* и *практическое* (прикладное). В данном изло-



Рис. 1.1. Базовые понятия метрологии и измерительной техники

жении главное внимание уделим именно основным положениям практической метрологии.

Представим базовые понятия метрологии тремя взаимосвязанными блоками: “Измерение”, “Единство измерений”, “Точность измерений” (рис. 1.1).

Рассмотрим наиболее важные понятия и определения в рамках каждого блока.

1.1. ИЗМЕРЕНИЕ

Измерением называют процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств (средств измерений).

1.1.1. Физическая величина

Физическая величина (ФВ) — это свойство, в качественном отношении общее для многих физических объектов, но в количественном отношении — индивидуальное для каждого объекта. Все многообразие ФВ может быть классифицировано по множеству различных признаков. Наиболее важным для нашего изложения является деление всех ФВ на две группы: *неэлектрические* и *электрические* величины. Первых (неэлектрических величин), конечно, гораздо больше, чем электрических. Это, например, длина, объем, масса, сила, давление, скорость линейного движения или вращения, расход вещества, температура, относительная влажность, освещенность и множество других. К электрическим ФВ относятся, например, электрический заряд, сила тока, напряжение, электрические сопротивление и емкость, проводимость, активная и реактивная мощности, электрическая энергия и др.

Значение ФВ — это количественная оценка ФВ в виде конкретного числа принятых для этой величины единиц. *Например, значение тока в электрической цепи равно $I = 10,2 \text{ А}$.*

1.1.2. Виды средств измерений

Средство измерений (СИ) — техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики. Все СИ (в соответствии с РМГ 29-99. ГСИ. “Метрология. Основные термины и определения”) делятся на пять видов: меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы.

Мера — это СИ, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. *Например, нормальный гальвани-*

ческий элемент (мера ЭДС); образцовый (измерительный) резистор; образцовая катушка индуктивности и т.п.

Измерительный преобразователь — СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для дальнейшего преобразования, передачи, обработки, хранения, но не предназначенной для непосредственного восприятия наблюдателем. *Примеры* — измерительные трансформаторы тока и напряжения, измерительные усилители, делители напряжения, шунты, добавочные резисторы, цифровые измерительные регистраторы (логгеры) и т.п. Измерительный преобразователь не имеет отсчетного устройства и поэтому результат преобразования не может быть воспринят человеком.

Измерительный прибор — это СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, т.е. имеет отсчетное устройство или индикатор. *Например, электромагнитный щитовой вольтметр, самопишущий прибор, осциллограф, аналоговый тестер, цифровой мультиметр.* Измерительный прибор, пожалуй, наиболее распространенный вид СИ.

Измерительная установка — совокупность функционально объединенных СИ и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенная в одном месте. *Примеры: лабораторная установка для исследования характеристик электродвигателей, стенд для поверки электрических счетчиков и т.п.* Отличие измерительной установки от измерительной системы заключается в ее локальности, компактности размещения.

Измерительная система — совокупность СИ и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и/или использования в автоматических системах управления. *Примером может служить многоканальный пространственно распределенный информационно-измерительный комплекс в составе системы управления технологическим процессом.*

Нормируемые метрологические характеристики (НМХ) СИ регламентируются ГОСТ 8.009-84. "Нормируемые метрологические характеристики средств измерений". К основным НМХ относятся, например, погрешности СИ, номинальная функция преобразования или коэффициент преобразования измерительного преобразователя, чувствительность, диапазон измерений, входное сопротивление.

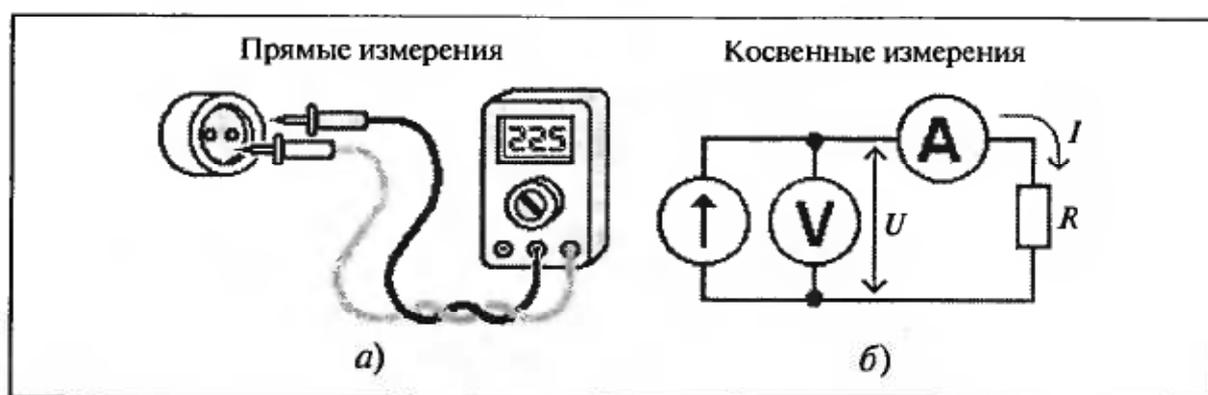


Рис. 1.2. Виды измерений

1.1.3. Виды и методы измерений

Получать значения ФВ (результаты измерений) можно различными способами. В нынешней практике электрических измерений применяются разнообразные виды и методы измерений. По видам различают прямые, косвенные, совокупные и совместные измерения. Наиболее распространены в этой группе прямые и косвенные измерения.

Прямые измерения — это такие, при которых искомое значение измеряемой величины находят непосредственно из опытных данных. *Пример прямого измерения — измерение действующего значения напряжения электрической сети с помощью цифрового мультиметра (рис. 1.2, а).*

Косвенные измерения — это измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной функциональной зависимости между этой величиной и исходными величинами, оцениваемыми прямыми измерениями. *Пример: измерение мощности P на активной нагрузке R с помощью амперметра A и вольтметра V (рис. 1.2, б):*

$$P = UI,$$

где U — напряжение на нагрузке R , измеренное вольтметром V ; I — ток в нагрузке, измеренный амперметром A .

Совокупность приемов использования физических принципов и средств измерений называют методом измерений. Различают метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой (рис. 1.3).

В **методе непосредственной оценки** значение измеряемой величины определяется прямо (непосредственно) по отсчетному устройству измерительного прибора. *Пример — измерение действующего значения фазного тока щитовым электромагнитным амперметром.*

Метод сравнения основан на сравнении измеряемой величины с мерой. Процедура сравнения может быть выполнена по-разному.

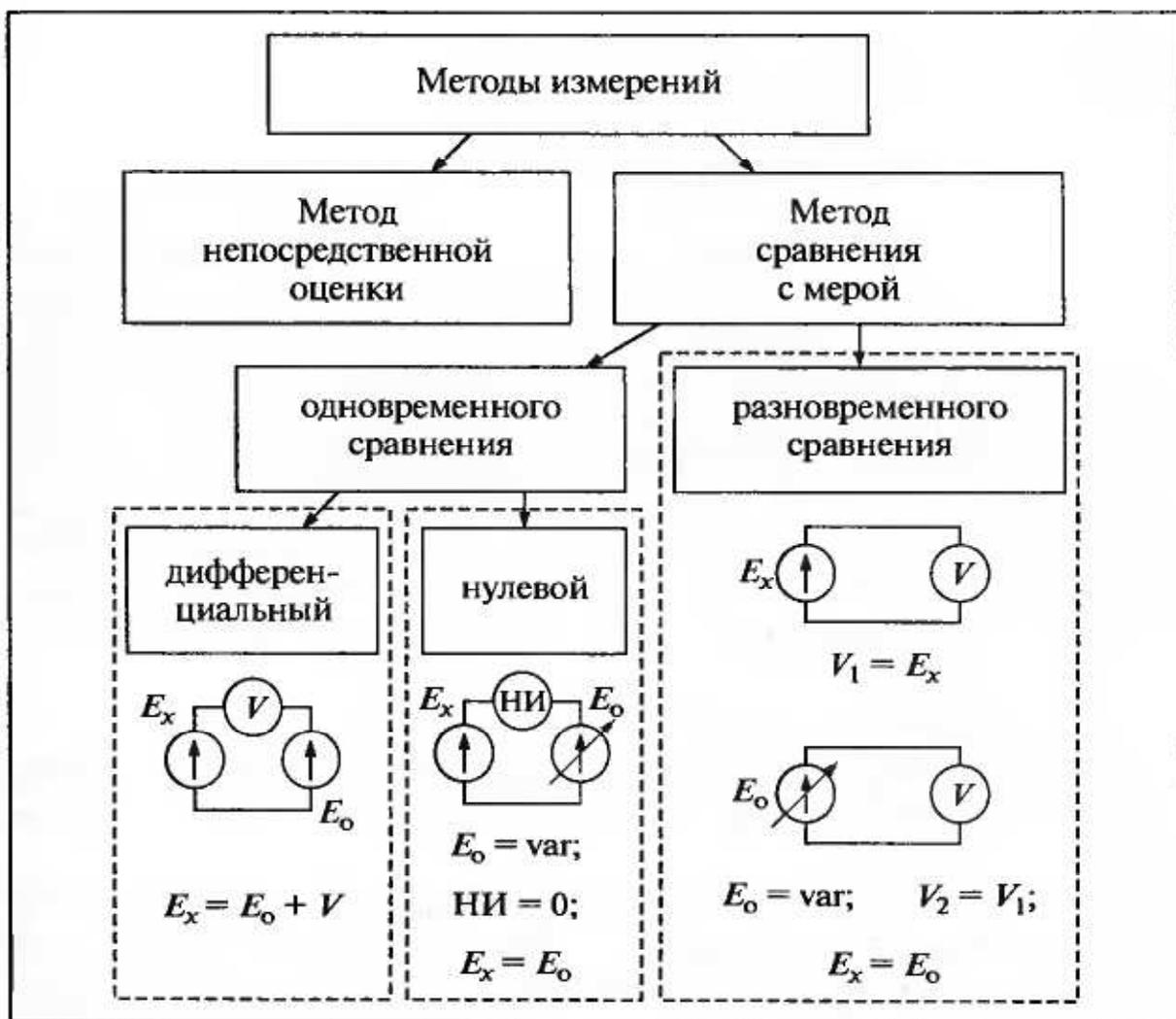


Рис. 1.3. Методы измерений

Это может быть одновременное или разновременное сравнение величины с мерой (см. рис. 1.3). В свою очередь, метод одновременного сравнения делится на дифференциальный и нулевой. В первом методе — *дифференциальном* — измеритель (например, вольтметр V) оценивает разность между измеряемой величиной E_x и известной E_o воспроизводимой мерой. Во втором — *нулевом* — разница между измеряемой величиной E_x и известной E_o доводится до нуля с помощью изменения известной величины E_o . Факт достижения равенства $E_x = E_o$ определяется показаниями *нулевого индикатора (НИ)*. Типичный пример реализации нулевого метода — измерение сопротивления уравновешиваемым мостом постоянного тока.

В методе разновременного сравнения, как следует из названия, сравнение измеряемой величиной E_x и изменяемой известной E_o происходит в режиме поочередного измерения. Если показания измерителя (например, вольтметра V) при измерении величины E_x равны V_1 то, подключив известную E_o и, изменяя ее значение до до-

стижения равенства результатов второго и первого измерения $V_2 = V_1$, получаем равенство $E_x = E_0$.

1.2. ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ

Под *единством измерений* понимают такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности результатов измерений известны с известной или заданной вероятностью. Единство измерений позволяет сопоставлять результаты измерений, выполненные в разных местах, в разное время, разными специалистами, с помощью разных средств измерений. Единство измерений обеспечивается использованием общепринятой системой единиц физических величин, стандартизацией, метрологическим обеспечением, эталонами и образцовыми средствами измерений, соответствующей нормативно-технической документацией.

1.2.1. Единицы физических величин

Единица физической величины — это такая физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице.

В нашей стране, как и в большинстве других стран мира, действует Международная система единиц (System International — SI). Система основана на выборе нескольких основных единиц, независимых и достаточных для образования других (производных) единиц.

Основные, дополнительные и производные единицы. В соответствии с ГОСТ 8.417-81 ГСИ. “Единицы физических величин.” Все единицы делятся на *основные* (их семь), *дополнительные* (их две) и

Таблица 1.1. Основные и дополнительные единицы

Физическая величина	Наименование единицы	Русское обозначение	Международное обозначение
<i>Основные</i>			
Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s
Электрический ток	ампер	А	A
Термодинамическая температура	кельвин	К	K
Количество вещества	моль	моль	mol
Сила света	кандела	кд	cd
<i>Дополнительные</i>			
Плоский угол	радиан	рад	rad
Телесный угол	стерадиан	ср	sr

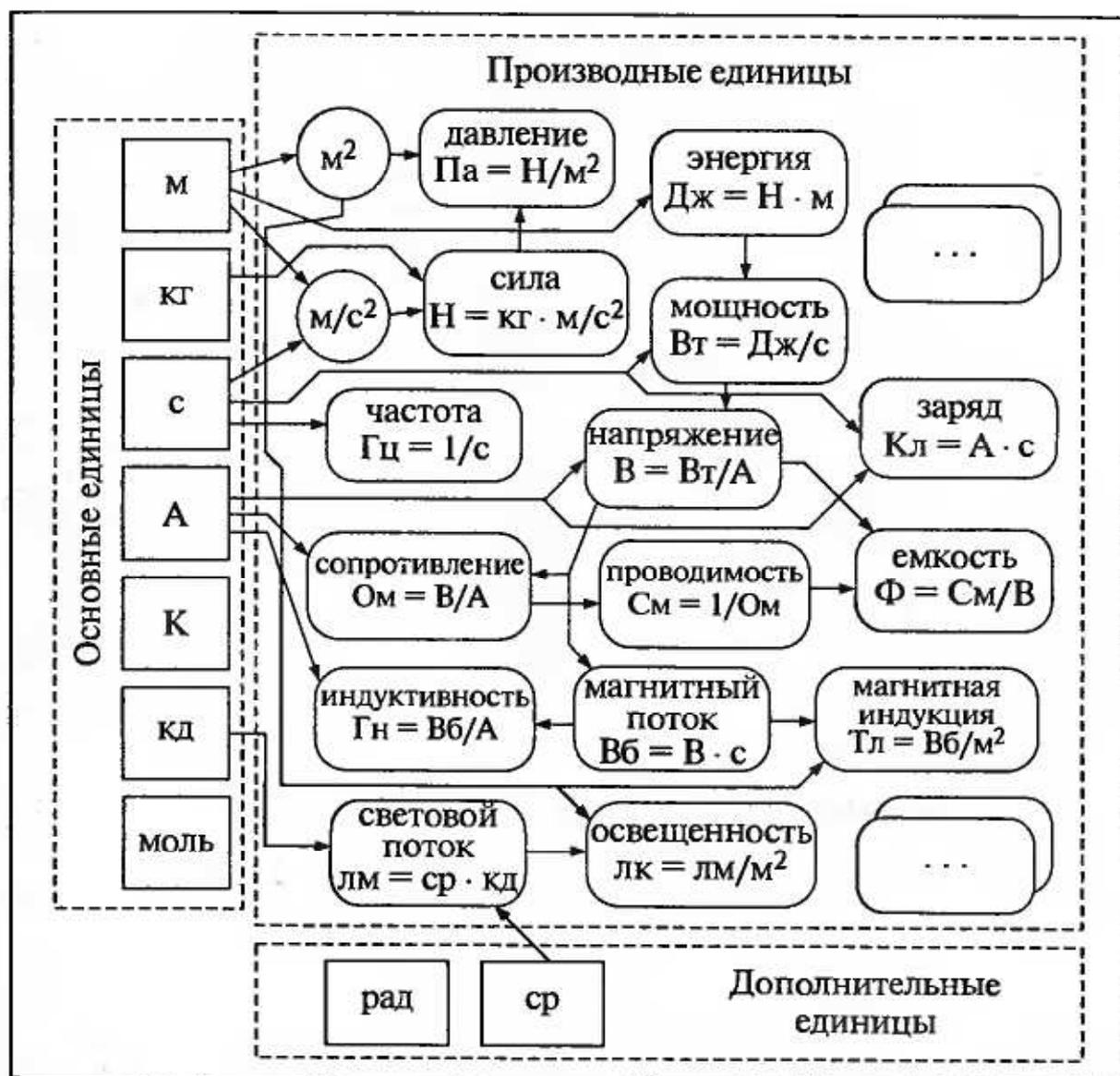


Рис. 1.4. Взаимосвязь основных, дополнительных и производных единиц

производные (около 200 и их число растет). В табл. 1.1 приведен перечень основных и дополнительных единиц.

Отметим, что конкретное значение размера основной единицы не имеет значения. Например, в качестве основной единицы длины мог бы выступать не метр, а, скажем, фут или аршин. Главное, чтобы эта единица была общепринята, конечно, узаконена и выступала бы основой при формировании производных единиц.

Производные, единицы образуются из основных, дополнительных и других производных путем разнообразных функциональных преобразований. Например, производная единица “ом” образована отношением производной единицы “вольт” к основной единице “ампер”. Формирование некоторых производных единиц иллюстрирует рис. 1.4.

Таблица 1.2. Коэффициенты кратных и дольных единиц

Приставка	Русское обозначение	Русское сокращение	Международное обозначение	Международное сокращение	Примеры
10^{18}	экса-	Э	exa-	E	—
10^{15}	пета-	П	peta-	P	—
10^{12}	тера-	Т	tera-	T	2,5 ТОм
10^9	гига-	Г	giga-	G	1,2 ГГц
10^6	мега-	М	mega-	M	1,44 Мбайт
10^3	кило-	к	kilo-	k	0,4 кВ
10^2	гекто-	г	hekto-	h	1,5 га
10^1	дека-	да	deka-	da	10 дал
10^0	—	—	—	—	—
10^{-1}	деци-	д	deci-	d	60 дБ
10^{-2}	санти	с	canti-	c	185 см
10^{-3}	милли-	м	milli-	m	20 МОм
10^{-6}	микро-	мк	micro-	mk (μ)	450 мкА
10^{-9}	нано-	н	nano-	n	100 нВ
10^{-12}	пико-	п	pico-	p	50 пФ
10^{-15}	фемто-	ф	femto-	f	250 фА
10^{-18}	атто-	а	atto-	a	—

Таблица 1.3. Относительные единицы

Единица	Обозначение	Значение	Примеры
Процент	%	1/100 часть = 0,01	$\pm 1\%$ от $120^\circ\text{C} = \pm 1,2^\circ\text{C}$
Промилле	‰	1/1000 часть = = 0,001 (1 ‰ = 0,1 %)	5 ‰ от 100 л = 0,5 л
ppm (part-per-million)	ppm	1/10 ⁶ = 0,000001	20 ppm от 100 В = 2 мВ

Таблица 1.4. Логарифмические единицы

Единица	Обозначение	Значение	Примеры
Бел	Б	1 Б = $\text{Lg}(P_1/P_2)$ при $P_1/P_2 = 10$ 1 Б = $2\text{Lg}(F_1/F_2)$ при $F_1/F_2 = \sqrt{10}$	—
Децибел	дБ 1 дБ = 0,1 Б	1 дБ = $10\text{Lg}(P_1/P_2)$ 1 дБ = $20\text{Lg}(F_1/F_2)$	$P_1 = 100$ кВт, $P_2 = 1$ кВт, $N = 20$ дБ $F_1 = 1000$ В, $F_2 = 10$ В, $N = 40$ дБ
Декада	дек	1 дек = $\text{Lg}(f_1/f_2)$, при $f_1/f_2 = 10$	Диапазон частот от 10 до 100 кГц
Октава	окт	1 окт = $\text{Log}_2(f_1/f_2)$, при $f_1/f_2 = 2$	Диапазон частот от 10 до 20 кГц

Примечание. P_1 и P_2 — физические величины типа мощность (например, мощность, энергия); F_1 и F_2 — физические величины типа сила (например, напряжение, ток).



Рис. 1.5. Графическая иллюстрация относительных и логарифмических величин

Кратные и дольные единицы. Поскольку диапазоны значений измеряемых величин сегодня очень широки, то невозможно обойтись только исходными системными (основными, дополнительными и производными) единицами. Для удобства работы и записи результатов используются вспомогательные единицы — так называемые *кратные* (большие единицы) и *дольные* (меньшие единицы), которые образованы путем введения приставок (коэффициентов) к исходным системным единицам (табл. 1.2).

Относительные и логарифмические единицы. Для оценки отношения или относительного изменения физических величин удобно использовать вспомогательные единицы: относительные и логарифмические (табл. 1.3, табл. 1.4).

На рис. 1.5 приводится графическая иллюстрация некоторых относительных и логарифмических единиц.

1.2.2. Стандартизация

Интересно отметить, что всего несколько десятилетий назад в мире не было единообразия единиц физических величин. В разных странах, в разных отраслях науки, техники, промышленного производства, в сельском хозяйстве, в торговле использовалось множество различных единиц для оценки одних и тех же величин. Такое национальное (территориальное), отраслевое и межотраслевое разнообразие единиц сильно затрудняло сопоставление и использование результатов научных исследований, электротехнических измерений и расчетов, выполненных разными специалистами, и/или в разных направлениях, и/или в разных странах; создавало чрезвычайные трудности и серьезно тормозило развитие мирового сообщества.

В середине XX века Международный комитет мер и весов подготовил и принял новую систему единиц, которая была названа Международной системой единиц. В 1963 г. в СССР был введен ГОСТ 9867-61, в соответствии с которым эта система была рекомендована для использования в нашей стране.

Сегодня средства измерений разрабатывают и серийно выпускают тысячи различных отечественных и зарубежных организаций и фирм, профессионально применяют миллионы специалистов, так или иначе, использует в своей повседневной деятельности практически все взрослое население Земли. В настоящее время доля затрат на измерительную технику, обслуживание и метрологическое обеспечение в промышленном производстве достигает 25 – 30 % стоимости основных фондов. Причем, чем выше культура производства на предприятии, тем выше доля таких затрат. В этих условиях чрезвычайно важно обеспечить единство измерений.

Законодательной основой стандартизации является система Государственных стандартов (ГОСТ). В настоящее время в нашей стране действует десятки тысяч Государственных стандартов. Они отражают важнейшие характеристики и свойства разнообразной продукции, особенности методик измерений, характеристики СИ и т.п.

Стандарт — это нормативно-технический документ, устанавливающий перечень норм, правил, требований к объекту (стандартизации) и утвержденный уполномоченным органом (например, Госстандартом России).

Пример обозначения ГОСТ:

ГОСТ 8.401-80 ГСИ. Классы точности средств измерений.

Основные положения.



В соответствии с РМГ 29-99 (Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. “Метрология. Основные термины и определения”), *метрологическая аттестация СИ* — это признание метрологической службой узаконенным для применения средства измерений единичного производства (или ввозимого единичными экземплярами из-за границы) на основании тщательных исследований его свойств.

Поверка СИ (в соответствии с РМГ 29-99) — это установление органом государственной метрологической службы (или другим официально уполномоченным органом, организацией) пригодности СИ к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждение их соответствия установленным обязательным требованиям.

Поверку, как правило, осуществляют путем сравнения результатов преобразования (или измерения) испытуемого СИ с результатами преобразования (измерения) рабочего эталона (т.е. более точного СИ). Для частного, но весьма распространенного случая поверки измерительного прибора, показания поверяемого прибора сличают с показаниями более точного прибора. Погрешность рабочего эталона (образцового СИ) должна быть по крайней мере втрое меньше погрешности испытуемого СИ при одних и тех же условиях эксперимента. Процедура поверки СИ не эквивалентна процедуре калибровки.

В соответствии с РМГ 29-99, *калибровка* — совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного СИ и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона с целью определения действительных метрологических характеристик этого СИ. Калибровке могут подвергаться СИ, не подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору. Результаты калибровки позволяют, в частности, определить поправки к показаниям СИ, уменьшить систематические погрешности и скорректировать характеристику преобразования СИ

В частном случае при калибровке поочередно подают на вход СИ образцовую измеряемую величину с нулевым значением (например, “закоротив” вход СИ) и затем образцовую измеряемую величину со

значением, равным верхнему пределу диапазона измерения (с помощью специальной меры, иногда встроенной в СИ). Зафиксировав результаты преобразования (показания прибора) образцовых величин, можно в дальнейшем корректировать результаты преобразований в процессе выполнения измерений. Такая процедура позволяет уменьшить как аддитивную, так и мультипликативную погрешности.

1.2.3. Эталоны

Эталон — это СИ, обеспечивающее хранение и/или воспроизведение единицы физической величины с целью передачи ее размера другим СИ и официально утвержденное. Реально эталон может представлять собой комплекс, состоящий из нескольких различных СИ. На рис. 1.6 приведена схема передачи размера единицы ФВ.

В этой метрологической цепи высшим звеном является *международный эталон*. Эти эталоны хранятся в Международном бюро мер и весов (Франция). *Государственные эталоны* — это эталоны, обеспечивающие наивысшую в данной стране точность. Хранение эталонов — сложнейшая научно-техническая задача, поэтому они хранятся в метрологических институтах.

Эталоны, воспроизводящие одну и ту же единицу ФВ, в зависимости от точности воспроизведения единицы, делятся на *первичные*



Рис. 1.6. Схема передачи размера единицы

эталоны (обеспечивающие наивысшую в данной стране точность) и *вторичные* (образованные сличением с первичным и служащие для организации поверочных работ). *Специальный эталон* предназначен для воспроизведения единицы в особых условиях, когда первичный эталон не может быть использован. Первичные и специальные эталоны утверждаются в качестве государственных и являются исходными для каждой страны.

Вторичные эталоны необходимы для обеспечения поверочных работ и сохранности первичных эталонов и делятся на эталоны-свидетели, эталоны-копии, эталоны сравнения и рабочие эталоны.

Эталон-свидетель предназначен для проверки государственного эталона и замены его в случае утраты. *Эталон-копии* и *эталон сравнения* используются для взаимного сличения. *Рабочие эталоны* необходимы для передачи размера единицы рабочим СИ.

Рабочие СИ применяются для разнообразных измерений, не связанных с поверкой. В электрических измерениях используются рабочие меры ЭДС, сопротивления, индуктивности, емкости и др.

1.3. ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Количественным, выражением качественного понятия "точность" является *погрешность*. Следует различать погрешность результата измерения (это более общее понятие) и погрешность инструмента (СИ).

1.3.1. Погрешность результата измерений

Истинное, значение измеряемой величины принципиально не может быть найдено (грамотный экспериментатор, понимая это, и не стремится к этому). Поэтому и реальное (истинное) значение погрешности результата определить не представляется возможным. И этого обычно не требуется. Вполне достаточно оперировать оценкой (т.е. приблизительным значением измеряемой величины) и диапазоном возможных значений погрешности. В случае простейшего детерминированного подхода (подхода по наихудшему случаю) используют предельное значение погрешности в каждом конкретном случае. То есть такое значение, превысить которое реальная погрешность гарантированно не может.

Понятие погрешности — довольно сложное и емкое понятие. Рассмотрим некоторые основные фрагменты классификации погрешностей результата измерений (рис. 1.7).

Первый классификационный признак можно кратко сформулировать так: "Что (кто) является причиной ошибки?"

2777



Рис. 1.7. Упрощенная классификация погрешностей результата измерения

Суммарная погрешность результата любого измерения в общем случае складывается из трех составляющих: инструментальной, методической и субъективной.

Инструментальная составляющая определяется основными метрологическими характеристиками собственно инструмента (т.е. СИ), его основной и дополнительной погрешностями.

Методическая составляющая погрешности результата измерения зависит от используемого метода измерения, и не зависит от погрешности самого инструмента. Методическая погрешность может быть значительной, однако часто она может быть оценена или даже скомпенсирована (иногда — практически полностью).

Субъективная составляющая не зависит ни от погрешности прибора, ни от метода измерения, а в основном определяется квалификацией пользователя (субъекта). Эту погрешность не всегда можно предвидеть и заранее оценить. Она может присутствовать в результате любого измерения.

Второй классификационный признак — способ выражения погрешности (табл. 1.5).

Абсолютная погрешность Δ — самая простая и понятная — это разность между измеренным X и истинным $X_{\text{ист}}$ (или действительным $X_{\text{д}}$, т.е. полученным более точным прибором) значениями измеряемой величины.

Таблица 1.5. Абсолютная и относительная погрешности

Форма представления	Формула
Абсолютная погрешность	$\Delta = X - X_{\text{д}}$
Относительная погрешность, %	$\delta = \frac{\Delta}{X_{\text{д}}} 100 \approx \frac{\Delta}{X} 100$

Примечание. X — измеренное значение величины (результат измерения); $X_{\text{д}}$ — действительное значение измеряемой величины.



Рис. 1.8. Зависимость погрешностей от значения измеряемой величины X :
 а — аддитивная погрешность; б — мультипликативная погрешность; в — погрешность линейности

Относительная погрешность δ — отношение абсолютной погрешности к действительному X_d (или измеренному X) значению, выраженное в процентах.

По зависимости (в абсолютном виде) от значения измеряемой величины X погрешности делятся на аддитивные, мультипликативные и погрешности линейности (рис. 1.8).

Аддитивной Δ_a называется погрешность, значения которой (будучи представленными в абсолютной форме), не выходят за рамки независящего от значения измеряемой величины X коридора (рис. 1.8, а). Поведение фактической погрешности внутри этого коридора может быть любым, т.е. реальная погрешность может принимать любые значения, не выходящие за эти границы.

Мультипликативной Δ_m называют такую погрешность, значения которой не выходят за рамки линейно зависящего, от значения измеряемой величины X коридора (рис. 1.8, б). Любое другое поведение характерно для погрешности линейности Δ_l (рис. 1.8, в).

По характеру проявления погрешности делятся на систематические и случайные.

Систематическая — это такая погрешность, значение которой при повторении экспериментов неизменно, или меняется по известному закону. Систематические погрешности, как правило, могут быть оценены и, следовательно, учтены путем введения поправок в результат измерения.

Случайные — это такие погрешности, значения которых непредсказуемы. К случайным же относятся и различные промахи (сбои), которые объясняются или грубой ошибкой оператора, или кратковременной неисправностью аппаратуры, или влиянием внешних электромагнитных полей. В случае многократных измерений влияние случайной погрешности можно уменьшить обработкой полу-

ченных результатов, например, нахождением их среднего арифметического значения.

1.3.2. Погрешности средств измерений

Как правило (и обычно — в грамотно организованных экспериментах), определяющей составляющей в суммарной погрешности результата измерения является погрешность собственно СИ, т.е. инструментальная погрешность. В свою очередь эта составляющая может быть классифицирована показанным на рис. 1.9 образом. Некоторые классификационные признаки являются общими и для погрешности результата измерения, и для погрешности СИ. Специфические классификационные признаки, характерные именно для СИ (т.е. инструментальные погрешности), выделены на рис. 1.9 серым фоном (заливкой).

По первому классификационному признаку (способу выражения) погрешности СИ делят на абсолютные, относительные и приведенные. Первые две формы рассмотрены выше (п. 1.3.1). *Приведенная* погрешность γ — это отношение абсолютной погрешности Δ к нормирующему значению X_H (часто это верхний предел диапазона измерения) прибора, выраженное в процентах.

Второй классификационный признак также рассмотрен в п. 1.3.1.

Основная погрешность имеет место в нормальных условиях эксплуатации СИ (в частности, прибора), т.е. когда значения всех влияющих величин находятся в пределах заранее оговоренных диапазонов.

Дополнительная погрешность возникает при изменении влияющих величин (например, температуры окружающей среды) за пределы нормальных значений.

Статическая погрешность СИ (прибора) — погрешность при измерении значения постоянной (или очень медленно меняющейся) величины, т.е. в случае статических измерений (при использовании статической модели объекта исследования).



Рис. 1.9. Упрощенная классификация погрешностей средств измерений

Динамическая погрешность возникает при исследовании достаточно быстро меняющейся во времени величины (точнее информативного параметра измеряемой величины). Например, если действующее значение (в данном случае информативный параметр) переменного напряжения электрической сети неизменно и измеряется щитовым электромагнитным вольтметром, то будет иметь место только статическая погрешность, хотя сама входная величина (напряжение — функция времени) меняется с частотой примерно 50 Гц.

Взгляды на систематические и случайные погрешности СИ — аналогичны рассмотренным в п. 1.3.1.

1.3.3. Классы точности средств измерений

Класс точности — это обобщенная метрологическая характеристика СИ, определяемая предельными значениями допускаемых основной и дополнительных погрешностей. Классы точности различных СИ могут задаваться по-разному в соответствии с ГОСТ 8.401-80. “Классы точности средств измерений. Общие требования”. Настоящий стандарт устанавливает деление СИ по классам точности, способы нормирования метрологических характеристик, комплекс требований к которым зависит от класса точности СИ, а также — обозначения классов точности.

Пределы допускаемых погрешностей СИ выражаются в форме абсолютной, относительной и приведенной погрешностей (табл. 1.6).

В случае, если погрешность СИ носит аддитивный характер, то класс точности задается пределом основной абсолютной или приведенной погрешностей (позиции 1 и 2 в табл. 1.6). Если погрешность СИ носит мультипликативный характер, то класс точности задается

Таблица 1.6. Формы задания классов точности

№	Форма представления	Формула
1.	Предел основной абсолютной погрешности	$\Delta_n = \pm a$
2.	Предел основной приведенной погрешности, %	$\gamma_n = \frac{\Delta}{X_n} 100 = \pm p$
3.	Предел основной относительной погрешности, %	$\delta_n = \frac{\Delta}{X_n} 100 = \pm q$
4.	Предел основной абсолютной погрешности	$\Delta_n = \pm (a + bX)$
5.	Предел основной относительной погрешности	$\delta_n = \pm \left[c + d \left(\frac{X_k}{X} - 1 \right) \right]$

Примечание. Здесь X_n — нормирующее значение СИ; X_n — действительное значение измеряемой величины; X — измеренное значение измеряемой величины; X_k — конечное значение диапазона измерения СИ; a, b, c, d, p, q — постоянные коэффициенты — отвлеченные положительные числа, выбираемые из ряда $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $(1,6 \cdot 10^n)$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $(3 \cdot 10^n)$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$, где $n = 1; 0; -1; -2$ и т.д.

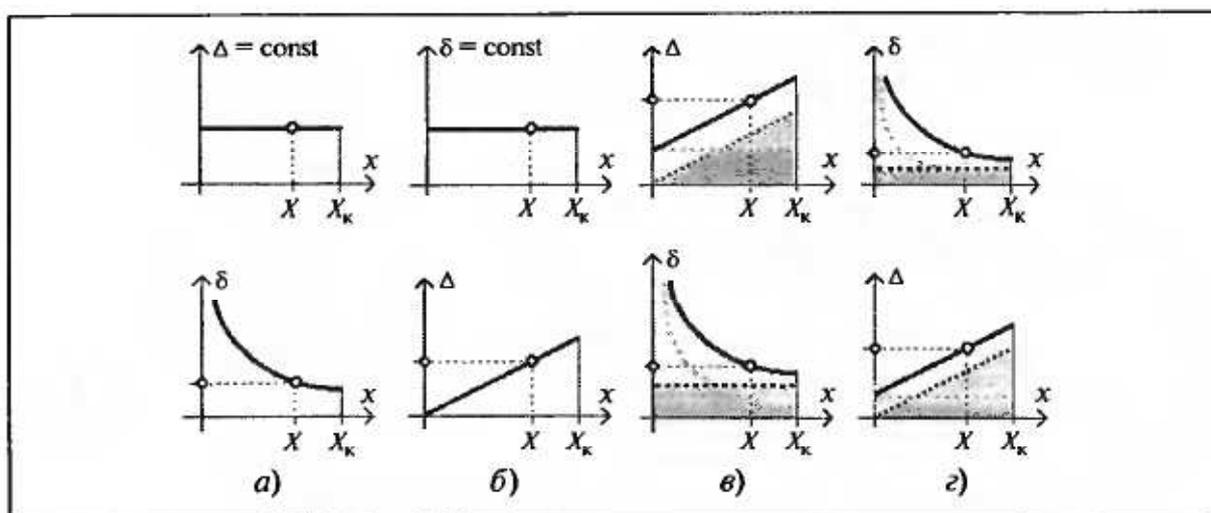


Рис. 1.10. Графическое представление форм задания классов точности

пределом основной относительной погрешностей (позиция 3 в табл. 1.6). Если же погрешность имеет как аддитивную, так и мультипликативную составляющие, то класс точности может задаваться пределом абсолютной погрешности (позиция 4 в табл. 1.6) или пределом основной относительной погрешности (позиция 5 в табл. 1.6).

На рис. 1.10 приведена графическая иллюстрация разных способов задания классов точности. На рис. 1.10, а приведены случаи 1 и 2 из табл. 1.6, на рис. 1.10, б приведен вариант 3 из табл. 1.6, на рис. 1.10, в и рис. 1.10, г — случаи 4 и 5 из табл. 1.6. Для упрощения изображения на рис. 1.10 показаны не симметричные коридоры предельных значений погрешностей, а лишь их модули.

Классы точности простых измерительных приборов невысокой точности, например, щитовых стрелочных вольтметров, задаются пределом основной приведенной погрешности (случай 2 из табл. 1.6). Для самопишущих приборов характерным является задание класса точности пределом основной относительной погрешности (случай 3 из табл. 1.6). Для СИ средней и высокой точности применяются варианты 4 и 5 из табл. 1.6. Например, для мостов, компенсаторов, цифровых измерительных приборов, как правило, используется вариант 5 из табл. 1.6. Наиболее распространенной во всем мире (и одновременно наиболее понятной) формой задания погрешностей для современных цифровых СИ является вариант 4 из табл. 1.6.

При этом предел основной абсолютной погрешности $\Delta_{\text{п}}$ { содержит и аддитивную ($\pm a$) и мультипликативную ($\pm bX$) составляющие:

$$\Delta_{\text{п}} = \pm (a + bX),$$

где X — значение измеряемой величины; a и b — постоянные коэффициенты.

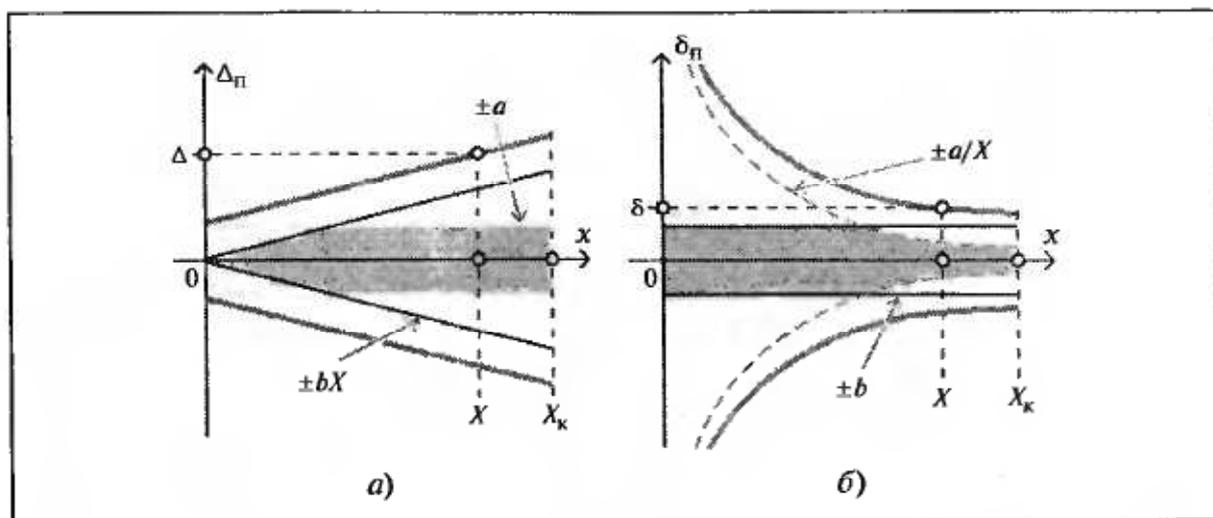


Рис. 1.11. Аддитивная, мультипликативная составляющие и суммарная погрешность в абсолютном и относительном видах

На рис. 1.11, а приведена графическая иллюстрация аддитивной, мультипликативной составляющих и суммарной погрешности для абсолютной формы представления, а на рис. 1.11, б — иллюстрация этих составляющих и суммы, представленных в относительном виде.

Форма задания класса точности пределом абсолютной погрешности, содержащей аддитивную и мультипликативную составляющие, может иметь несколько вариантов записи. Например, класс точности цифрового термометра может быть задан таким образом:

$$\Delta_{\pi} = \pm (0,5 \% \text{ результата} + 2 \text{ единицы МЗР}),$$

где МЗР — младший значащий разряд.

Здесь первое слагаемое — это мультипликативная погрешность (зависящая от значения измеряемой величины), а второе — аддитивная (независящая от результата).

Другой пример, цифровой мультиметр в режиме измерения переменных напряжений имеет класс точности, определяемый выражением:

$$\Delta_{\pi} = \pm (1,0 \% \text{ результата} + 0,5 \% \text{ диапазона измерения}).$$

Для зарубежной аппаратуры (и для англоязычной литературы) характерна такая форма записи класса точности:

$$\Delta = \pm (aFS + bR),$$

где FS (Full Scale) — верхнее значение диапазона измерений; R (Reading) — результат измерения (отсчет); a , b — постоянные коэффициенты.

1.3.4. Основная и дополнительная погрешности

Основная инструментальная погрешность находится по классу точности СИ. Например, при нормальных условиях щитовым электромагнитным вольтметром класса точности 1,5 (т.е. имеющим предел основной приведенной погрешности $\gamma_{\text{п}}$ не превышающий $\pm 1,5 \%$) с диапазоном измеряемых значений $0 - 300 \text{ В}$ (т.е. нормирующее значение $X_{\text{н}} = 300 \text{ В}$) получен результат измерения действующего значения напряжения $U = 220 \text{ В}$. Требуется определить предельные значения абсолютной $\Delta_{\text{п}}$ и относительной $\delta_{\text{п}}$ составляющих инструментальной погрешности результата измерения U .

Оценим предельное значение основной абсолютной погрешности $\Delta_{\text{п}}$:

$$\Delta_{\text{п}} = (\gamma_{\text{п}} X_{\text{к}}) / 100 = \pm (1,5 \cdot 300 \text{ В}) / 100 = \pm 4,5 \text{ В}.$$

Предельное значение основной относительной погрешности $\delta_{\text{п}}$, %, составит (примерно):

$$\delta_{\text{п}} = (\Delta_{\text{п}} \cdot 100) / U = \pm (4,5 \cdot 100) / 220 \approx \pm 2,0 \%.$$

Расчет суммарной погрешности результата измерения в общем случае предполагает нахождение максимально возможного числа составляющих (основной, дополнительной, методической, взаимодействия и т.д.).

Дополнительная погрешность возникает при работе СИ (в частности, прибора) не в нормальных, а в рабочих условиях, когда одна или несколько влияющих величин выходят за пределы области нормальных значений (но находятся внутри диапазона рабочих значений).

Влияющая величина (ВВ) — это такая физическая величина (З, которая не измеряется в данном эксперименте, но влияет на результат измерения или преобразования. Например, в эксперименте по измерению тока в электрической цепи некоторые другие физические величины (температура окружающей среды, атмосферное давление, относительная влажность воздуха, электрические и магнитные поля, напряжение питания СИ) являются ВВ. Конечно, если мы измеряем значение температуры окружающей среды, то эта физическая величина в данном эксперименте не является влияющей, а есть измеряемая величина.

Влияющие величины в общем случае могут меняться в довольно широких диапазонах. При оценке работоспособности СИ в различных условиях воздействия окружающей среды различают три области возможных значений ВВ:

- область *нормальных* значений ВВ (при этом значение ВВ находится в пределах заранее оговоренных — нормальных — значений);

- область *рабочих* значений ВВ (при этом значение ВВ находится в диапазоне своих рабочих значений);
- область значений ВВ, при которых возможны *хранение или транспортировка СИ*.

С точки зрения оценки инструментальных погрешностей нас интересуют лишь первые две области (рис. 1.12). Область нормальных значений ВВ задается обычно симметричным относительно номинального значения β_0 диапазоном: $\beta_1 - \beta_2$. В этом диапазоне возможных значений ВВ условия применения СИ считаются *нормальными (НУ)* и при этом имеет место только основная погрешность СИ.

Областью рабочих значений называется более широкий диапазон возможных изменений ВВ, в котором СИ может нормально использоваться. Границы этого диапазона задаются нижним β_n и верхним β_v предельными значениями ВВ, соответственно. В этом диапазоне значений ВВ условия применения СИ называются *рабочими (РУ)* и при этом имеет место не только основная, но еще и дополнительная погрешность. Таким образом, при работе в пределах рабочих условий, но за пределами нормальных, общая инструментальная погрешность складывается уже из суммы основной и дополнительной составляющих.

Например, для самой важной практически во всех измерительных экспериментах ВВ — температуры окружающей среды — область нормальных (для России) значений и, следовательно, нормальных условий применения СИ в большинстве обычных технических измерительных экспериментов составляет $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$, или $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$.

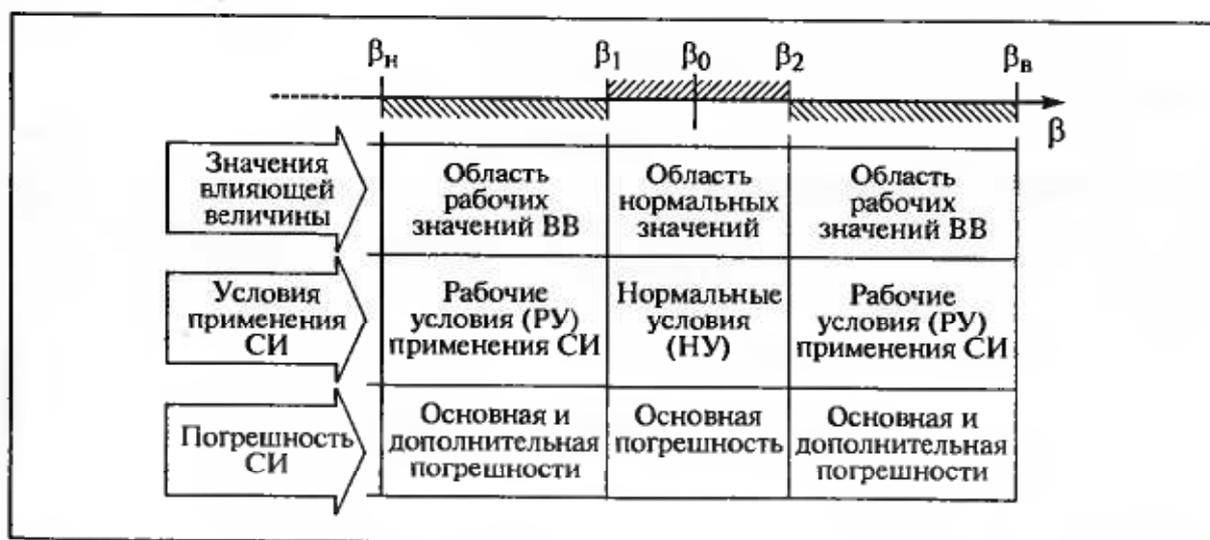


Рис. 1.12. Значения влияющей величины, условия применения и погрешности СИ

Таблица 1.7. Диапазоны нормальных значений ВВ

Влияющая величина	Значение
Температура окружающей среды	$(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C} - (20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$
Относительная влажность воздуха	$(55 - 60) \%$
Атмосферное давление	$(100 \pm 4) \text{ кПа} / (750 \pm 30) \text{ мм рт. ст.}$
Действующее значение напряжения питающей сети	$220 \text{ В} \pm 10 \%$
Частота напряжения питающей сети	$50 \text{ Гц} \pm 1 \%$
Максимальный коэффициент нелинейных искажений напряжения питающей сети	5%

Области нормальных значений не являются фиксированными (постоянными), а зависят от особенностей выполняемых измерений, измеряемых величин, классов точности СИ. Например, чем точнее СИ, тем уже требуемый диапазон нормальных температур. Для мер электрического сопротивления высшего класса точности (0,0005; 0,001; 0,002) допускаемое отклонение температуры от номинального значения составляет $\pm 0,1$; $\pm 0,2$; $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Для зарубежных приборов часто за номинальное принимается значение температуры $+23 \text{ }^\circ\text{C}$. Номинальные значения и диапазоны нормальных значений некоторых основных ВВ для обычных измерений приведены в табл. 1.7.

Области нормальных значений ВВ в специальных измерениях оговариваются отдельно в описании СИ или в методиках проведения измерений.

Диапазоны рабочих условий эксплуатации для СИ разного назначения различны. Скажем, для СИ лабораторного применения это может быть диапазон температур от 0 до $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1.13).

Для СИ промышленного применения области рабочих значений ВВ являются более широкими, чем, скажем, для лабораторных СИ. Измерительная аппаратура военного назначения имеет еще более широкие области рабочих значений ВВ.

Условия хранения (транспортировки) допускают наиболее широкие диапазоны значений ВВ. Например, для основного параметра окружающей среды — температуры, в паспорте на прибор может быть записано: "...диапазон рабочих температур: $0 \div +40 \text{ }^\circ\text{C}$, диапа-

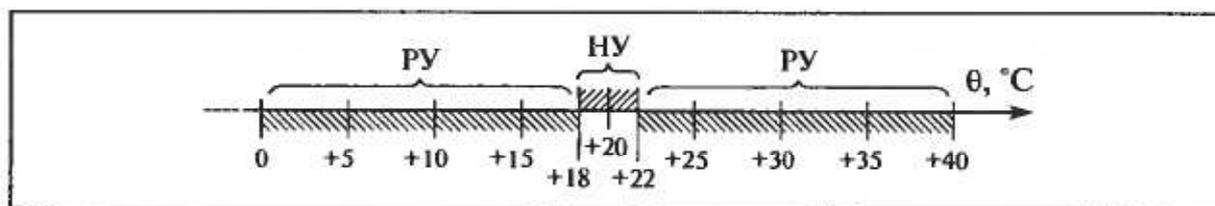


Рис. 1.13. Диапазоны возможных значений влияющей величины — температуры

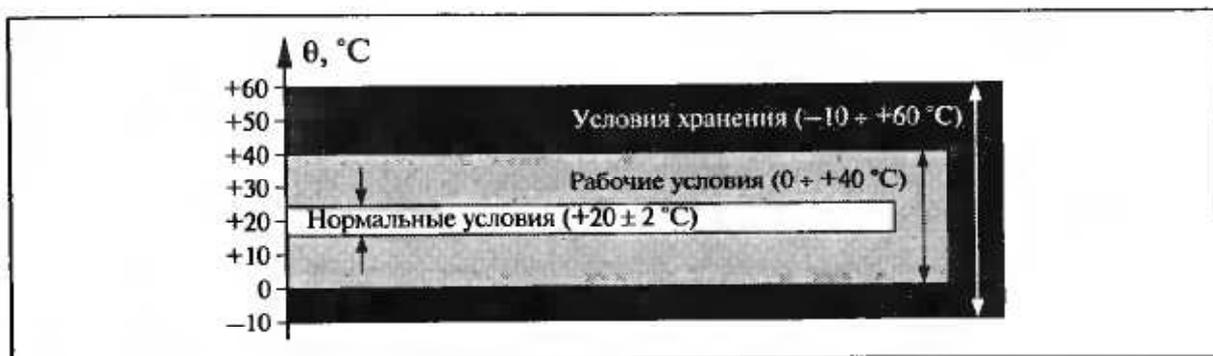


Рис. 1.14. Пример количественных значений диапазонов значений влияющей величины — температуры

зон температур хранения: $-10 \div +60 \text{ }^\circ\text{C}$ ". На рис. 1.14 приведен пример различных диапазонов влияющей величины — температуры.

Зная класс точности, коэффициенты влияния окружающей среды (например, температурный коэффициент), а также коэффициенты влияния неинформативных параметров измеряемых сигналов (например, частоты периодического сигнала напряжения при измерении действующего значения), можно оценить значение дополнительной погрешности и затем найти суммарную инструментальную погрешность, сложив основную и дополнительную составляющие.

Рассмотрим пример нахождения оценки дополнительной составляющей инструментальной погрешности на примере влияния только одной (но самой важной и, к счастью, наиболее легко определяемой) ВВ — температуры. Допустим, после выполнения эксперимента по классу точности миллиамперметра найдена его основная инструментальная абсолютная погрешность $\Delta_0 = \pm 1,0 \text{ мА}$; температура в ходе эксперимента была зафиксирована равной $+28 \text{ }^\circ\text{C}$. Температурный коэффициент в паспорте на прибор определен таким образом: "... дополнительная погрешность на каждые $10 \text{ }^\circ\text{C}$ отличия от номинальной температуры $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ равна основной погрешности в пределах изменения температуры окружающей среды от 0 до $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ ". Тогда предельное значение дополнительной абсолютной погрешности Δ_d в данном случае определяется таким образом:

$$\Delta_d = \Delta_0(28 - 20)/10 = \pm 1,0 \cdot 8/10 = \pm 0,8 \text{ мА.}$$

Таким образом, суммарная инструментальная абсолютная погрешность равна:

$$\Delta_\Sigma = (\Delta_0 + \Delta_d) = \pm (1,0 + 0,8) \text{ мА} = \pm 1,8 \text{ мА.}$$

1.3.5. Методическая погрешность

Как известно, погрешность результата измерения определяется не только классом точности СИ. Источниками недоуверности ре-

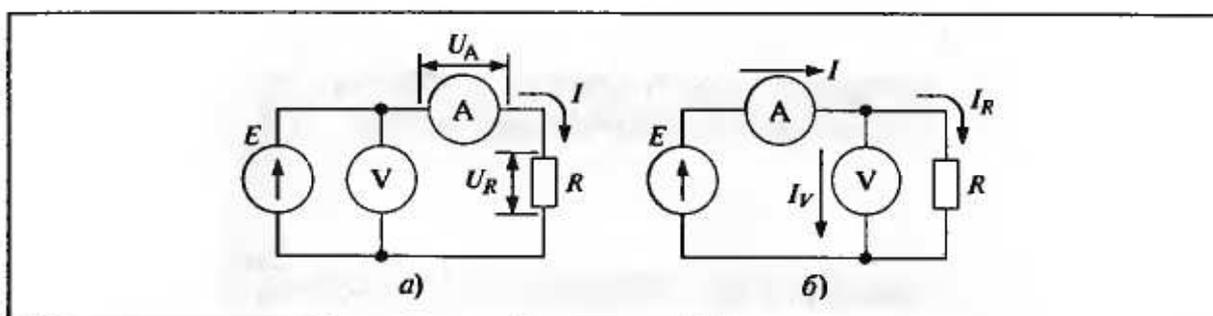


Рис. 1.15. Возникновение методической погрешности

зультата могут быть и другие причины. Рассмотрим примеры, поясняющие появление методической составляющей общей погрешности результата.

Представим эксперимент по косвенному измерению мощности на активной нагрузке R методом амперметра и вольтметра (рис. 1.15, а). В результате простого перемножения показаний вольтметра U и амперметра I мы получаем не совсем то значение, которое следовало бы, поскольку в этом эксперименте возникает погрешность, определяемая не классами точности приборов, а другими их характеристиками (например, внутренними сопротивлениями) и методом их использования (например, схемой включения).

Вольтметр в этой схеме (рис. 1.15, а) реагирует на сумму $(U_R + U_A)$, т.е. на сумму падений напряжений на нагрузке R и на внутреннем сопротивлении амперметра R_A . Показания вольтметра U , вычисленное P и действительное P_d значения мощности, соответственно, равны:

$$U = I(R_A + R);$$

$$P = UI;$$

$$P_d = I^2 R.$$

Таким образом, в данном случае причина ошибки в наличии конечного (хоть и малого, но не нулевого) внутреннего сопротивления амперметра R_A . Значение методической погрешности в абсолютном Δ и относительном δ (в процентах) видах в данном случае можно оценить таким образом:

$$\Delta = P - P_d = I^2 R_A;$$

$$\delta = \Delta \cdot 100/P_d \approx \Delta \cdot 100/P \approx R_A \cdot 100/R.$$

Зная значение сопротивления амперметра R_A , можно, во-первых, оценить значение методической погрешности для данного случая, а, во-вторых, можно скорректировать (исправить) результат вычисления мощности.

Рассмотрим количественный пример. Пусть в схеме рис. 1.15, а использован амперметр с внутренним сопротивлением $R_A = 10$ Ом.

Получены показания вольтметра и амперметра, соответственно, $U = 250$ В, $I = 2$ А. Вычисленная по этим показаниям мощность $P = UI = 500$ Вт. Абсолютная методическая погрешность $\Delta = I^2 R_A = 4 \cdot 10 = 40$ Вт, что составляет 8 % (!) результата измерения. Причем, в данном случае, при точном знании R_A , знак и значение этой погрешности известны точно. Таким образом, эту составляющую в этом примере можно практически полностью скомпенсировать (простым уменьшением вычисленного результата P на значение $\Delta = 40$ Вт).

Отметим, что изменение схемы включения приборов (перенос амперметра ближе к источнику ЭДС E — рис. 1.15, б) не исключает методическую погрешность, а просто несколько меняет ее природу. В этом случае причиной погрешности будет конечное (не бесконечно большое) внутреннее сопротивление R_V вольтметра и, как следствие, проходящий через него ток I_V . И, поскольку показания амперметра будут несколько завышены ($I = I_R + I_V$), то результат вычисления мощности P и в этом случае окажется больше, чем следовало бы.

Чем меньше отношение значений сопротивления амперметра R_A и нагрузки R в схеме рис. 1.15, а, тем лучше, т.е. тем меньше эта погрешность. Для второй схемы (см. рис. 1.15, б), чем выше сопротивление вольтметра R_V по сравнению с сопротивлением нагрузки R , тем лучше.

Можно было бы отдельно измерять напряжение и ток, поочередно включая вольтметр и амперметр. Но при такой организации эксперимента необходимо иметь уверенность, что измеряемые величины не изменяются в процессе эксперимента. Иначе может появиться значительная динамическая погрешность (см. ниже).

1.3.6. Погрешность взаимодействия

Погрешность взаимодействия $\Delta_{вз}$ — составляющая общей погрешности результата, возникает из-за конечных сопротивлений источника сигнала и прибора. Схема на рис. 1.16 поясняет природу

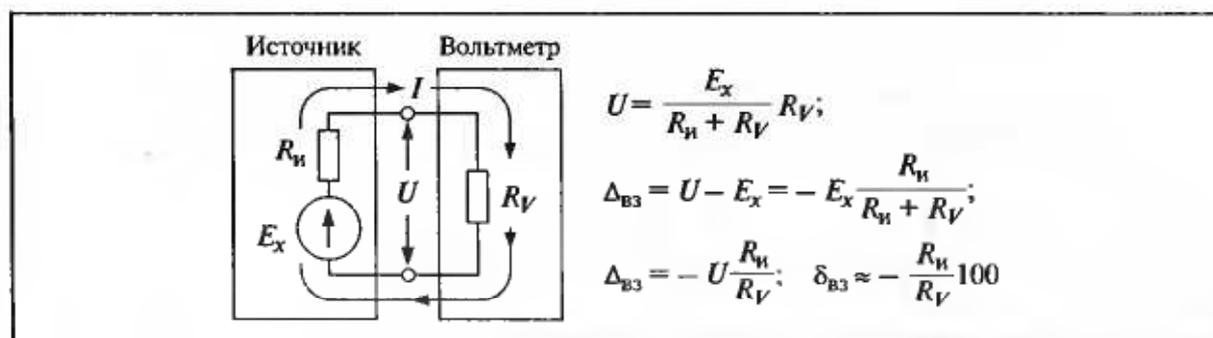


Рис. 1.16. Погрешность взаимодействия вольтметра и источника ЭДС

этой погрешности на примере эксперимента по измерению постоянного напряжения источника (с малым, но не нулевым внутренним сопротивлением $R_{и}$) с помощью вольтметра, входное сопротивление R_V которого хоть и велико, но не бесконечно.

При подключении вольтметра к источнику ЭДС в цепи потечет ток I , определяемый значением ЭДС E_x , а также значениями внутреннего сопротивления источника $R_{и}$ и входного сопротивления прибора R_V . Поэтому измеряемое вольтметром напряжение U всегда будет несколько меньше значения E_x что и приводит к появлению погрешности взаимодействия, $\Delta_{вз}$.

Оценим значение погрешности взаимодействия на примере. Предположим, к источнику ЭДС $E_x = 10$ В, имеющему внутреннее сопротивление $R_{и} = 10$ Ом, подключен аналоговый вольтметр с внутренним сопротивлением $R_V = 10$ кОм. Пренебрегая всеми остальными погрешностями, определим показания прибора, значения абсолютной $\Delta_{вз}$ и относительной $\delta_{вз}$ погрешностей взаимодействия. Показания U вольтметра в данном случае равны:

$$U = E_x R_V / (R_V + R_{и}) = 10 \cdot 10 / 10,01 = 9,99 \text{ В.}$$

Абсолютное и относительное значения погрешности взаимодействия равны, соответственно:

$$\Delta_{вз} = -0,01 \text{ В; } \delta_{вз} = -0,1 \text{ \%}.$$

При измерениях амперметрами тока также возникает погрешность взаимодействия (рис. 1.17). Амперметр имеет малое, но не нулевое внутреннее сопротивление R_A , и при включении его в цепь ток в ней несколько уменьшится.

Если пренебречь малым значением внутреннего сопротивления $R_{и}$ источника E , считая, что оно гораздо меньше сопротивления нагрузки $R_{н}$ ($R_{и} \ll R_{н}$) и меньше внутреннего сопротивления амперметра R_A ($R_{и} < R_A$), то можно говорить о том, что ток I в цепи с включенным амперметром определяется отношением значения ЭДС E к сумме сопротивлений нагрузки $R_{н}$ и амперметра R_A . А действительное значение тока I_d в замкнутой цепи без амперметра определяется

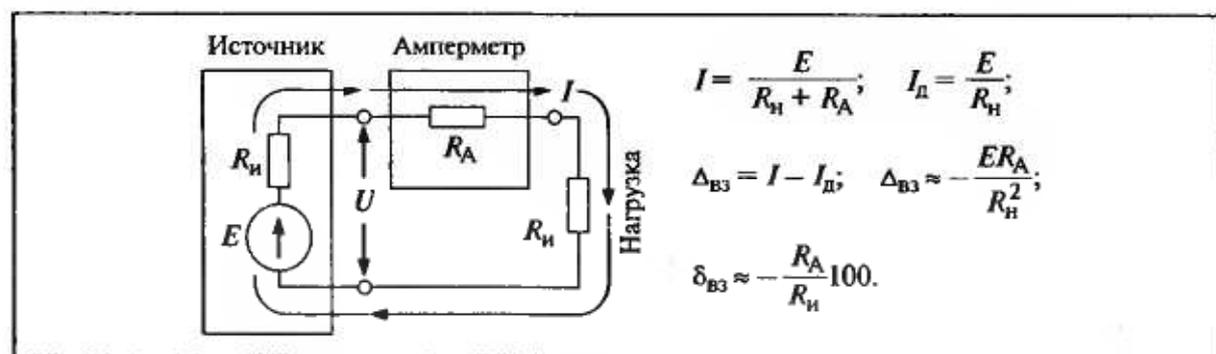


Рис. 1.17. Влияние амперметра на ток в цепи

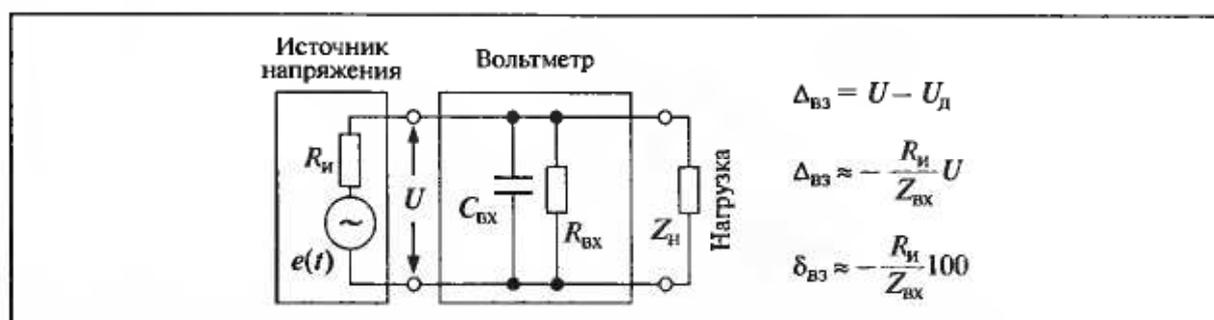


Рис. 1.18. Погрешность взаимодействия прибора и источника периодического напряжения

только сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$. Разница между значениями токов ($I - I_{\text{д}}$) и есть погрешность взаимодействия $\Delta_{\text{вз}}$ прибора и объекта исследования в данном случае.

При работе с переменными напряжениями и токами эта составляющая общей погрешности может быть заметно больше. Рассмотрим, например, взаимодействие прибора и источника периодического напряжения. Поскольку входное сопротивление вольтметра (или осциллографа) в общем случае есть комплексное сопротивление $Z_{\text{вх}}$, состоящее из активной части $R_{\text{вх}}$ и емкостной $C_{\text{вх}}$ (рис. 1.18), то общее входное сопротивление (входной импеданс) есть параллельное соединение активного и емкостного сопротивлений.

Погрешность взаимодействия в этом случае тем больше, чем меньше комплексное входное сопротивление $Z_{\text{вх}}$, т.е. чем меньше активная составляющая $R_{\text{вх}}$ и, чем больше значение входной емкости $C_{\text{вх}}$ прибора. С ростом частоты сигнала емкостная составляющая $Z_{\text{вх}}$ сильно уменьшается, что приводит к увеличению погрешности взаимодействия.

Правда, на низких частотах сигналов (а в электрических цепях промышленной частоты они сравнительно низкие — верхняя граница спектра обычно не выше сотен герц — единиц килогерц), емкостная составляющая $C_{\text{вх}}$ (обычно это десятки — сотни пикофарад) практически не проявляется и можно говорить только об активной составляющей $R_{\text{вх}}$ общего входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$ прибора.

1.3.7. Динамическая погрешность

Динамическая погрешность — это погрешность СИ, возникающая при измерении изменяющейся в процессе измерений физической величины.

Предположение о статической модели объекта (без имеющихся на то оснований) может привести к большим ошибкам. Инерционность прибора при быстромменяющихся входных сигналах рождает динамическую погрешность результата измерения, а иногда и просто приводит к невозможности определить результат. *Яркий пример:*

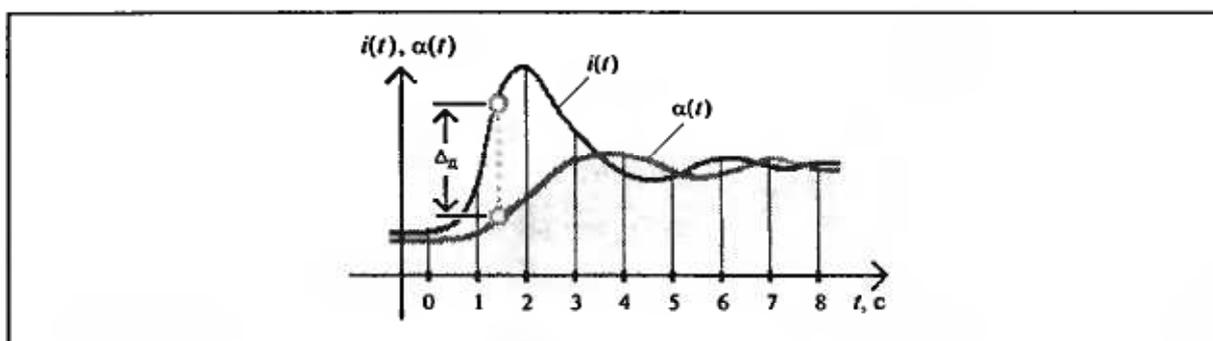


Рис. 1.19. Динамическая погрешность

магнитоэлектрический амперметр не в состоянии (правда и не предназначен для этого) зафиксировать кратковременный (длительностью, например, менее 1 с) импульс тока.

Проиллюстрируем возникновение динамической погрешности Δ_d при протекании через магнитоэлектрический измерительный механизм сравнительно быстро меняющегося тока. На рис. 1.19 показаны кривая изменения тока $i(t)$, текущего через механизм, и кривая изменения отклонения стрелки, т.е. показаний $\alpha(t)$. Механическая инерционность подвижной части прибора приводит к неизбежному отставанию ее реакции при быстрых изменениях тока. Возникающая при этом динамическая погрешность Δ_d тем больше, чем выше скорость изменения $i(t)$ и, чем больше масса подвижной части.

Меняющиеся исследуемые сигналы могут приводить к значительным погрешностям результатов косвенных измерений вследствие неодновременности выполнения различных исходных прямых измерений. Фактически это тоже динамическая погрешность, но в этом случае она определяется не быстродействием отдельных приборов, а скоростью изменения исследуемых параметров и особенностями организации эксперимента. Несинхронность получения отдельных исходных результатов измерения, как следствие выбранного метода (подхода), заставляет относить эту погрешность также и к методическим, поскольку она не зависит от характеристик (в частности, классов точности) самих приборов.

Проиллюстрируем природу возникновения этой погрешности на примере косвенного измерения активной мощности в однофазной электрической цепи одним прибором — цифровым мультиметром с токовыми клещами. Поочередно (с некоторой естественной временной задержкой Δt) измеряются текущие действующие значения напряжения U и тока I , а затем вычисляется значение активной мощности P (рис. 1.20).

Предположим, что в момент времени t_1 измерено действующее значение напряжения $U(t_1) = 220$ В. Затем, скажем через 1 мин, в

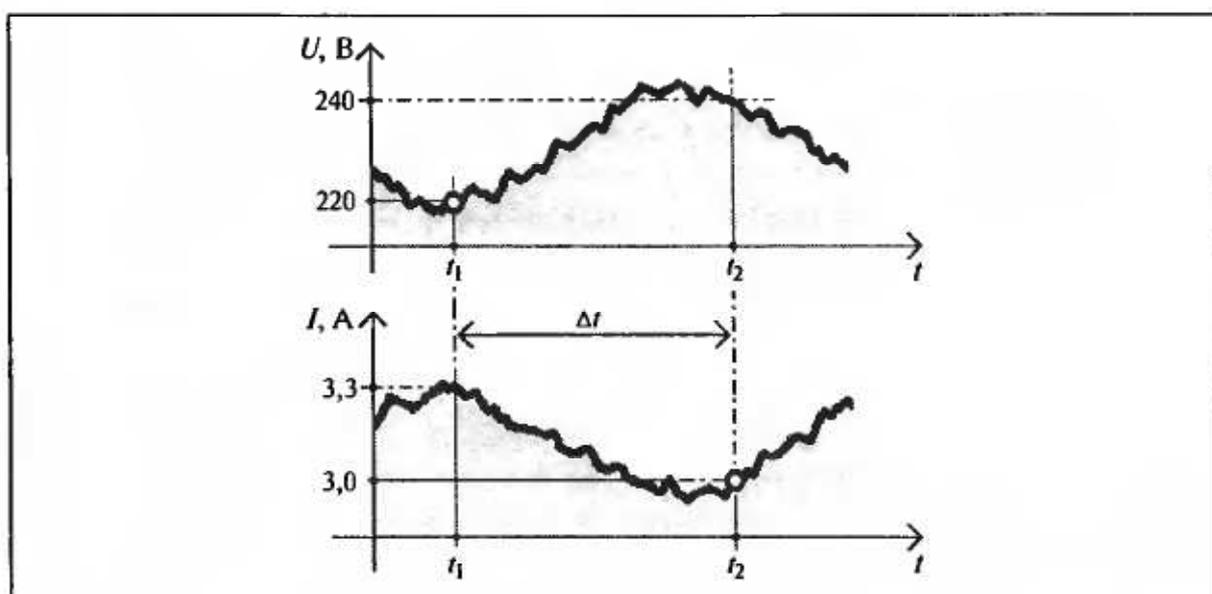


Рис. 1.20. Косвенное измерение мощности одним прибором

момент времени t_2 этим же прибором измерено действующее значение тока $I(t_2) = 3,0$ А. Далее по результатам этих исходных прямых измерений вычисляется значение активной мощности (нагрузку считаем чисто активной):

$$P = U(t_1)I(t_2) = 220 \cdot 3,0 = 660 \text{ Вт}$$

Между тем, реальные значения активной мощности P_p в моменты времени t_1 и t_2 были равны, соответственно,

$$P_p(t_1) = U(t_1)I(t_1) = 220 \cdot 3,3 = 726 \text{ Вт},$$

$$P_p(t_2) = U(t_2)I(t_2) = 240 \cdot 3,0 = 720 \text{ Вт}.$$

Таким образом, разница между вычисленным (660 Вт) и реальными (726 и 720 Вт) значениями активной мощности в данном случае составляет около 10 %. Причем, это без учета инструментальной погрешности прибора, погрешности взаимодействия и др.

Если аналогичная методика используется для оценки мощности в трехфазных электрических цепях, то ошибки могут быть значительно больше за счет большего общего времени задержки Δt .

1.3.8. Субъективная погрешность

Различают *нормальное* (штатное, объяснимое, предсказуемое) проявление субъективности отсчитывания при фиксации результата измерения (отсчета) и *ненормальное* (непредсказуемое). Появление *субъективной погрешности* естественно и типично при работе с аналоговыми стрелочными приборами в виде погрешности отсчитывания. *Погрешность отсчитывания* в общем случае складывается из двух составляющих: погрешности *интерполяции* и погрешности *параллакса* (рис. 1.21).

Первая составляющая — погрешность интерполяции (рис. 1.21, а) — неизбежно возникает при любой попытке определить положение указателя (стрелки) отсчетного устройства между двумя соседними делениями на шкале, т.е. оценить значение части деления — αq . При достаточном навыке оператора эта составляющая может иметь значение $\pm (0,2 \dots 0,1)$ веса одного деления q . У цифровых приборов есть похожая по природе составляющая — погрешность квантования, но там она не субъективна.

Погрешность параллакса возникает при неперпендикулярном взгляде на шкалу в момент определения положения стрелки (рис. 1.21, б). Чем больше расстояние L между шкалой прибора и стрелкой, тем больше возможная погрешность параллакса $\pm \Delta$. Эта составляющая при тщательно выполняемом эксперименте также может быть сведена до значения $\pm (0,2 \dots 0,1)$ веса одного деления q . В конструкции сравнительно точных стрелочных приборов (класс точности 0,5 и лучше) для устранения погрешности параллакса в плоскости шкалы устанавливают зеркало. Такая зеркальная шкала позволяет обеспечить строго перпендикулярный взгляд на шкалу. Отсчитывание при этом необходимо производить таким образом, чтобы стрелка закрывала свое отражение в зеркале (рис. 1.22).

На рис. 1.22, а и 1.22, б показаны ситуации с неправильными положениями головы наблюдателя при отсчитывании, при которых в зеркале ему видно отражение стрелки. Ситуация, показанная на рис. 1.22, в, соответствует правильному расположению (отражение стрелки в зеркале закрыто самой стрелкой).

Другим решением, позволяющим принципиально исключить погрешность параллакса, является использование вместо стрелки оптического отсчетного устройства, в котором при изменении значения измеряемой величины меняется положение светового пятна на шкале (рис. 1.23).

Поскольку при этом расстояние $L = 0$ (пятно, лежит непосредственно на поверхности шкалы), то результат отсчитывания естественно не зависит от расположения наблюдателя по отношению к прибору и, следовательно, не содержит погрешности параллакса. У

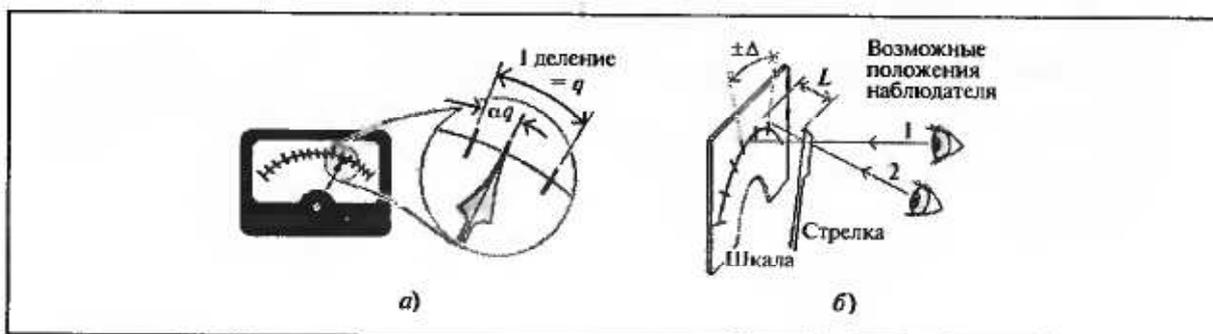


Рис. 1.21. Погрешности интерполяции и параллакса

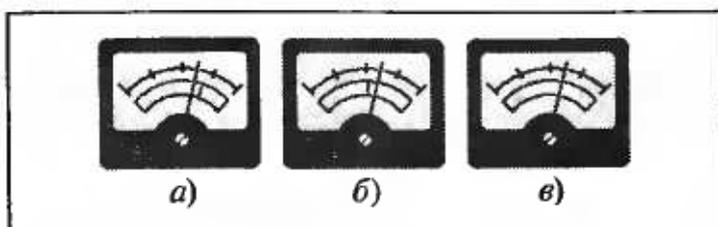


Рис. 1.22. Устранение погрешности параллакса



Рис. 1.23. Оптический отсчет

цифровых приборов этой составляющей субъективной погрешности результата принципиально нет.

К субъективным же относятся и непредсказуемые заранее погрешности, вызванные грубыми ошибками (промахами), как следствие низкой квалификации оператора и/или его плохого самочувствия. Типичным примером такой субъективной погрешности является ошибка в отсчете и/или записи результата при работе с многодиапазонными приборами, а также — при работе с приборами с нелинейными шкалами.

1.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Недостаточно требовать от средств измерения только определенных метрологических характеристик. Необходимо иметь уверенность, что при выполнении экспериментов аппаратура будет сохранять работоспособность и обеспечивать удовлетворительные характеристики. Поскольку в задачах технических (промышленных) измерений, экспресс-измерений условия проведения экспериментов могут быть самыми разнообразными (порой напоминающими полевые условия), то эксплуатационные характеристики используемых инструментов часто важнее метрологических.

При планировании конкретных измерений необходимо отчетливо представлять возможные условия проведения экспериментов и выбирать (использовать) оборудование с учетом его паспортных эксплуатационных характеристик. Возможные диапазоны изменения ВВ для нормального функционирования оговариваются в документации на средства измерения.

Любое электротехническое или электронное (в частности, измерительное) устройство должно отвечать некоторым вполне логичным требованиям по нормальной эксплуатации. Основные из них могут быть сведены в две группы требований.

Первая группа — характеристики влияния среды на устройство (его защищенность от воздействия температуры, относительной влажности воздуха, атмосферного давления, пыли, влаги, электромагнитного излучения и др.).

Вторая группа — влияние самого устройства на окружающую среду и безопасность работы человека с устройством (электробезопасность персонала, пожаробезопасность, взрывобезопасность, уровень электромагнитного излучения и др.).

Защищенность средств измерения от воздействия окружающей среды может характеризоваться степенью влияния различных параметров на работоспособность устройства и результаты экспериментов. Среди множества возможных ВВ чаще всего учитываются следующие:

- температура окружающей среды;
- относительная влажность воздуха;
- атмосферное давление (возможность работы прибора на определенной высоте над уровнем моря);
- магнитные и электрические поля, радиационное излучение;
- пыль, влага (вода), возможность работы оборудования на определенной глубине под водой (т.е. испытывая значительное давление);
- вибрация, ударное воздействие;
- качество питающей электрической сети.

Иногда оговариваются также степени защищенности измерительной аппаратуры от помех общего и нормального вида, от агрессивных сред, степень искробезопасности (возможность работы устройств во взрывоопасных средах).

Напомним: если все влияющие величины находятся в пределах нормальных значений, то у исправного средства измерений имеет место только основная погрешность. В диапазоне рабочих значений влияющих величин необходимо учитывать также и дополнительные погрешности.

Рассмотрим некоторые основные эксплуатационные характеристики измерительной аппаратуры и их количественные оценки.

1.4.1. Диапазоны температур

Как мы уже говорили, диапазоном нормальных температур (по умолчанию, т.е. если не оговорено другое) обычно считается диапа-

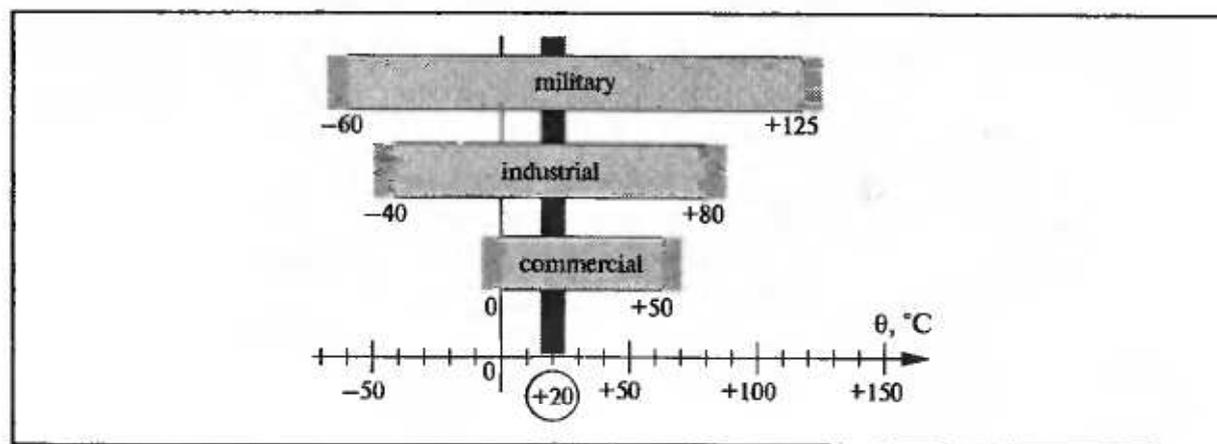


Рис. 1.24. Диапазоны рабочих температур

зон $+20 \pm 5$ °С (для зарубежных приборов часто $+23 \pm 5$ °С). Рабочие условия эксплуатации зависят от назначения аппаратуры и поэтому задаются в каждом случае отдельно. Во многих странах мира вся электронная аппаратура (и средства измерения тоже) разделяется на три большие группы: *коммерческого* (Commercial) или офисного использования, *промышленного применения* (Industrial Standard) и *военного применения* (Military Standard). На рис. 1.24 приведена иллюстрация разницы возможных диапазонов рабочих температур для обычного, промышленного и военного применения. Границы диапазонов не четкие, так как в разных странах, у разных производителей, для разных устройств эти границы могут несколько различаться. Типичные значения границ таковы: коммерческий диапазон: $(0 \div +50)$ °С; промышленный: $(-40 \div +80)$ °С; военный: $(-60 \div +125)$ °С.

1.4.2. Защищенность от пыли и влаги

Уже много десятилетий существует международный норматив, определяющий некоторые основные эксплуатационные характеристики электрических и электронных устройств: *International Protection (IP) Rating* — индекс защищенности устройства от пыли и влаги окружающей среды, а также электробезопасности персонала при работе с устройством. Норматив признан и успешно используется во всем мире. Его требования соответствуют ряду стандартов развитых

Таблица 1.8. Защищенность устройства от твердых частиц и электробезопасность

Цифра	Существо защиты	Характеристика защиты
0	Нет защиты	Никакой защиты устройства от пыли. Нет защиты персонала от возможного контакта с опасными токоведущими проводниками
1	Защита от крупных частиц (предметов)	Защита от проникновения в устройство предметов, диаметром более 50 мм. Защита от касания ладонью токоведущих проводников
2	Защита от частиц (предметов) среднего размера	Защита персонала от прикосновения к токоведущим частям. Защита от проникновения в устройство предметов, диаметром более 12 мм (например, пальца руки)
3	Защита от мелких частиц (предметов)	Защита персонала от прикосновения к токоведущим частям инструментом или пальцами. Защита от проникновения в устройство предметов, диаметром более 2,5 мм (например, отвертки)
4	Защита от песка	Защита персонала от прикосновения к токоведущим частям инструментом или пальцами. В устройство не могут попасть предметы, диаметром более 1,0 мм
5	Защита от пыли	Пыль может попадать внутрь устройства, но в количестве, не нарушающем работоспособности устройства
6	Полная защита от пыли	Внутри устройства не проникает никакая пыль

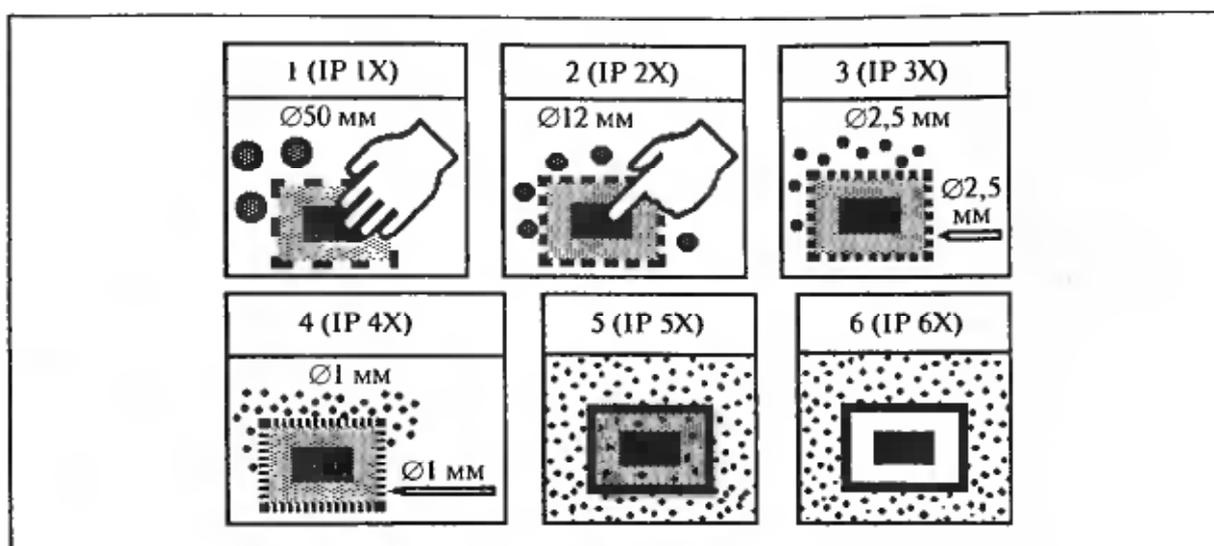


Рис. 1.25. Иллюстрация степеней защиты от твердых частиц и электробезопасности

стран и международных стандартов, например, DIN 400 50, BS 5490, NF C 20 – 010, IEC 529, NEMA и распространяются на устройства с напряжениями переменного тока до 1000 В и постоянного тока до 1500 В. В нашей стране также действует ГОСТ 14254-80 — аналог этого норматива. На устройствах, защищенность которых соответ-

ствует этому нормативу, ставится знак: 

Таблица 1.9. Защищенность устройства от влаги (воды)

Цифра	Существо защиты	Характеристика защиты
0	Нет защиты	Никакой защиты устройства от брызг влаги
1	Защита от вертикально падающих капель	Вертикально падающие капли не вызывают нарушения работоспособности устройства
2	Защита от капель, падающих под углом	Капли воды, падающие под углом до 15° не вызывают нарушения работоспособности устройства
3	Защита от капель, падающих под углом	Устройство защищено от капель воды, падающих под углом до 60°
4	Защита от брызг воды, падающих в любом направлении	Устройство защищено от брызг воды, которые могут быть направлены со всех сторон
5	Защита от струй воды	Струя воды (например, из шланга) не нарушает работоспособности устройства
6	Защита от заливания водой	Заливание устройства водой (например, на палубе корабля) не нарушает работоспособности устройства
7	Защита от погружения в воду	Устройство может быть полностью погружено в воду, оставаясь при этом работоспособным
8	Защита от погружения в воду на определенную глубину	Устройство сохраняет работоспособность при погружении в воду на определенную глубину (значение выдерживаемого давления указывается отдельно)

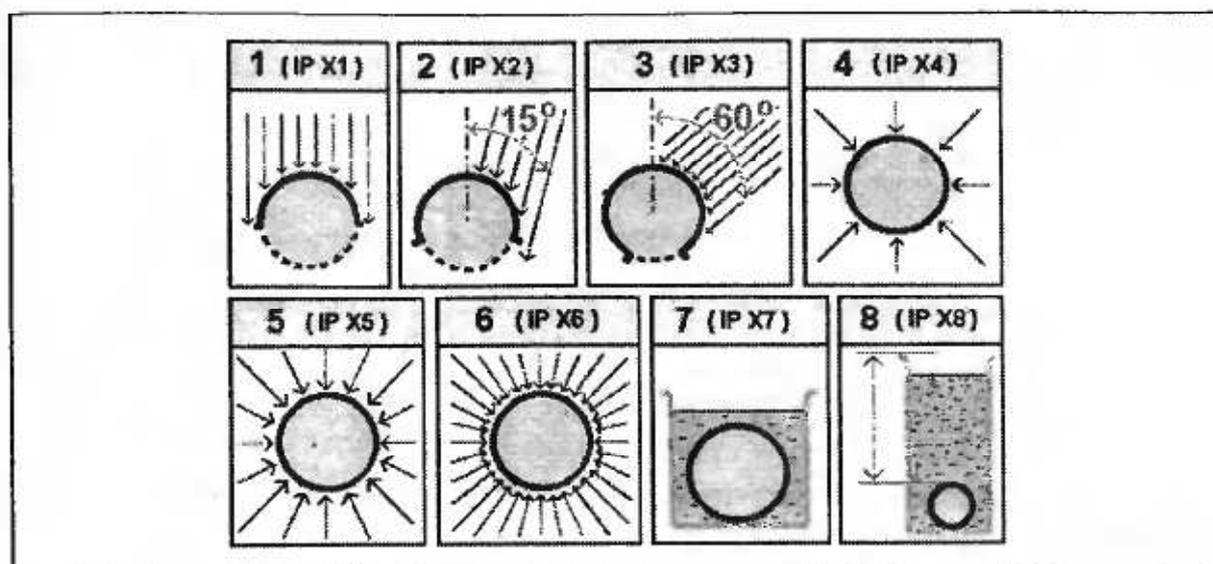


Рис. 1.26. Иллюстрация различных степеней защиты от влаги (воды)

Норматив IP не оговаривает защиту от агрессивных сред, давления, вибрации, электромагнитных полей, радиации и т.п., а характеризует только пыле-влажностоустойчивость устройства и электробезопасность работы с ним. Конкретная категория защищенности задается двумя цифрами — IP XX. Первая цифра в обозначении IP XX говорит о защите от твердых частиц (пыли, предметов) (табл. 1.8).

На рис. 1.25 иллюстрируются различные степени защиты от твердых частиц и электробезопасность персонала при работе с прибором.

Вторая цифра в обозначении IP XX говорит о защите от действия влаги (табл. 1.9).

На рис. 1.26 иллюстрируются различные степени защиты от влаги (воды).

Некоторые современные средства измерения/регистрации температуры разработаны с очень высоким уровнем защиты. Например, существуют миниатюрные цифровые измерительные регистраторы (Data Logger), предназначенные для длительной регистрации физических величин, степень защищенности которых характеризуется индексом IP 67.

Отметим, что для устройства, связанного с внешним миром кабелем (кабелями), необходимо позаботиться о соответствующей защищенности кабеля и разъёмного соединения.

1.4.3. Надежность оборудования

Надежность используемой измерительной и вычислительной аппаратуры — один из важнейших факторов, определяющий успех измерительного эксперимента. Надежность определяется особенностями схемотехники, конструкции, качеством сборки (техноло-

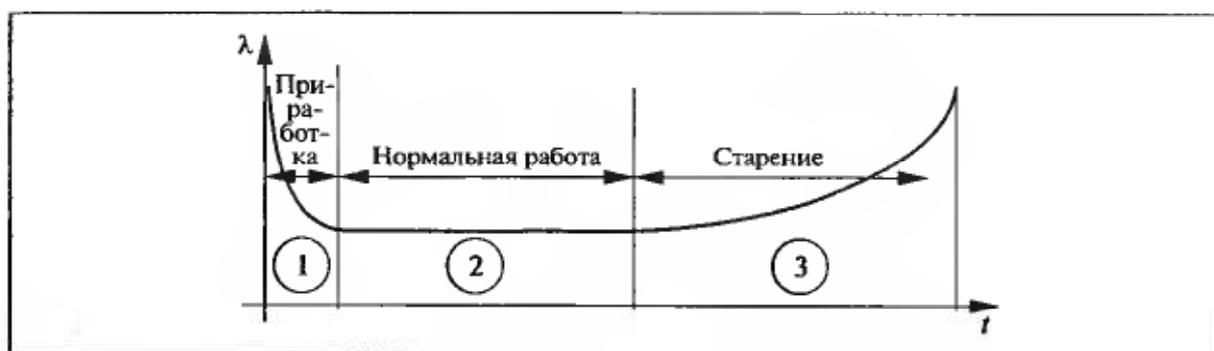


Рис. 1.27. Изменение интенсивности отказов λ во времени

гией), алгоритмом работы прибора, квалификацией пользователя, условиями проведения экспериментов и др.

Существует несколько различных подходов к вопросу количественной оценки надежности устройств вообще и средств измерений, в частности. Рассмотрим один из наиболее распространенных.

Надежность логично характеризовать вероятностным подходом, поскольку выход из строя (отказ) устройства — случайное событие, наступление которого трудно предсказать заранее. Для аппаратуры, выпускаемой достаточно большими сериями, используется понятие *интенсивности отказов* λ , отражающее статистическим образом процессы изменения характеристик приборов.

Естественно, что значение λ меняется в процессе существования (использования) серии устройств. На рис. 1.27 показан типичный характер поведения λ во времени в течение жизненного цикла устройств одного типа.

Выделяют три основных периода “жизни” устройства: период приработки (1), период нормальной работы (2), период старения (3). Продолжительности этих этапов различны (на рис. 1.27 соотно-

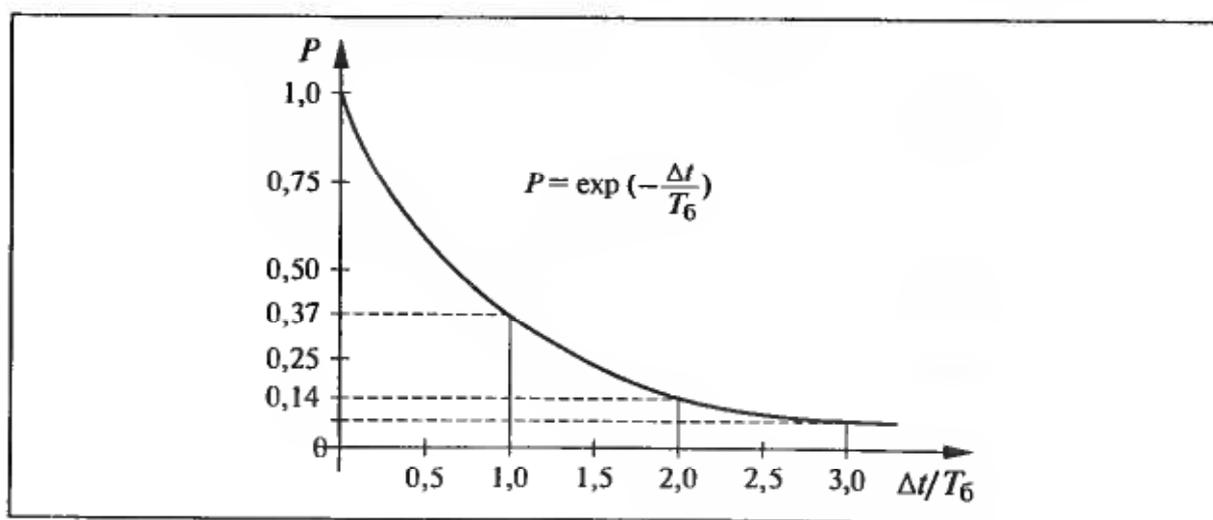


Рис. 1.28. Зависимость вероятности P от времени Δt

шение длительностей показано лишь качественно). Понятно, что, чем больше продолжительность периода (2) (нормальная эксплуатация устройства при полном соответствии реальных характеристик заложенным), тем лучше. Конечно, на изменение значения λ влияют как особенности схемотехники и конструкции, так и условия, в которых эксплуатируется устройство.

Часто для оценки надежности приборов изготовители указывают такой параметр как *среднее время безотказной работы* T_6 (или *среднее время наработки на отказ*). В англоязычной литературе — *MTBF* — *Mean Time Between Failures*. Этот параметр T_6 связан с интенсивностью отказов λ обратно пропорциональной зависимостью:

$$T_6 = 1/\lambda.$$

Имея значение интенсивности отказов λ , или значение среднего времени безотказной работы T_6 , можно оценить вероятность P нормальной работы прибора в течение заданного (или требуемого) интервала времени Δt . В общем случае вероятность P — экспоненциальная функция $P(\Delta t)$:

$$P(\Delta t) = \exp(-\lambda \Delta t) = \exp(-\Delta t/T_6).$$

Графическое представление этой зависимости показано на рис. 1.28.

По прошествии интервала времени Δt , равного требуемому интервалу T_6 , т.е. $\Delta t = T_6$, вероятность P того, что прибор все еще будет исправно работать, составит $P = 0,37$. А вероятность Q выхода прибора из строя к этому моменту времени, соответственно, будет равна $Q = 1 - P = 0,63$. Для интервалов времени $\Delta t = 2T_6$ значения вероятностей P и Q составят, соответственно, $P = 0,14$ и $Q = 0,86$. А для случая $\Delta t = 3T_6$ значения вероятностей P и Q составят, соответственно, $P = 0,08$ и $Q = 0,92$.

1.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Одно значение измеряемой величины (отдельный результат прямого измерения), получаемое в процессе измерительного эксперимента, называется *наблюдением*. Окончательный результат измерения находят, выполняя обработку нескольких наблюдений.

Процедура обработки заключается в общем случае в выполнении нескольких операций: исключение из ряда полученных наблюдений явно ошибочных, определение числового значения (оценки) собственно результата измерения (для косвенных измерений — по функциональной зависимости искомой величины от исходных), проведение статистической обработки, нахождение показателей точности

измерения (оценки погрешности), выбор формы представления окончательного результата. *При однократных (одиночных) прямых измерениях результат измерения совпадает с наблюдением.*

Запись окончательного (обработанного) результата любого измерения должна содержать численное значение результата, оценку суммарной погрешности измерения и значение доверительной вероятности $P_{\text{дов}}$, соответствующее этой погрешности. Например, корректная запись результата измерения сопротивления R может выглядеть так:

$$R = 106,2 \text{ Ом}; \Delta = \pm 2,5 \text{ Ом}; P_{\text{дов}} = 1.$$

Погрешность результата следует записывать одной или двумя значащими цифрами, причем вес младшего значащего разряда в числе результата измерения должен совпадать с весом младшего значащего разряда в числе погрешности, например, *неправильно* записывать окончательный результат измерения напряжения таким образом: $U = 224,6 \text{ В}; \Delta = \pm 5 \text{ В}; P_{\text{дов}} = 1.$

1.5.1. Обработка прямых измерений

Различают *однократные* (одиночные) и *многократные* (множественные) прямые измерения. Однократные — это самые простые по выполнению и обработке — наиболее распространены в практике технических измерений и означают получение окончательного результата по одному разовому наблюдению (отсчету).

Рассмотрим вопрос определения оценок основной, дополнительной (вызванной только одной влияющей величиной — температурой окружающей среды) и суммарной инструментальных погрешностей. Предположим, цифровым мультиметром с диапазоном измерения переменных напряжений $0 - 400,0 \text{ В}$ получен результат измерения действующего значения напряжения в электрической цепи: $U = 220,0 \text{ В}$. Класс точности прибора (предельное значение основной абсолютной погрешности $\Delta_{\text{п}}$) на этом диапазоне задан таким образом:

$$\Delta_{\text{п}} = \pm (0,005X_{\text{к}} + 0,005X),$$

где $X_{\text{к}}$ — верхнее значение диапазона измерения (в нашем случае $X_{\text{к}} = 400,0 \text{ В}$); X — измеренное значение, равное $220,0 \text{ В}$.

В паспорте на прибор записано "... дополнительная погрешность на каждые $10 \text{ }^\circ\text{C}$ отклонения от номинальной температуры $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ равна половине основной погрешности в пределах диапазона рабочих температур окружающей среды от 0 до $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ ". Температура окружающей среды во время эксперимента была зафиксирована равной

+35 °С. Все остальные ВВ, допустим, находились в пределах своих нормальных значений.

Для решения задачи воспользуемся наиболее простым (детерминированным) подходом — оценкой по наихудшему случаю, т.е. определим максимально возможные значения погрешностей при заданных условиях с доверительной вероятностью $P_{\text{дов}} = 1$. Предельное значение *основной* абсолютной погрешности Δ_0 равно:

$$\Delta_0 = \pm (0,005 \cdot 400 + 0,005 \cdot 220) = \pm (2,0 + 1,1) = \pm 3,1 \text{ В.}$$

Предельное значение *дополнительной* абсолютной погрешности Δ_d определяется так:

$$\begin{aligned} \Delta_d &= (1/2) \cdot \Delta_0 (35 - 20)/10 = \\ &= \pm (1/2) \cdot 3,1 \cdot 15/10 \approx \pm 2,3 \text{ В.} \end{aligned}$$

Суммарные инструментальные абсолютная Δ и относительная δ погрешности результата измерения равны, соответственно:

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta_d \approx \pm (3,1 + 2,3) \approx \pm 5,4 \text{ В;}$$

$$\delta \approx \pm (5,4/220) \cdot 100 \% \approx \pm 2,5 \%.$$

Напомним, что *реальные* погрешности могут иметь любые конкретные значения, *не превышающие* этих рассчитанных *предельных* значений.

Правильная запись окончательного результата этого измерения выглядит так:

$$X = 220,0 \text{ В; } \Delta = \pm 5,4 \text{ В; } P_{\text{дов}} = 1;$$

где X — результат измерения; Δ — предельное значение суммарной инструментальной абсолютной погрешности; $P_{\text{дов}}$ — доверительная вероятность того, что реальное значение погрешности не превзойдет рассчитанного значения Δ (т.е. реальная инструментальная погрешность в данном эксперименте ни при каких обстоятельствах не может превысить по модулю значения 5,4 В).

Отметим, что расчет суммарной погрешности результата измерения в общем случае предполагает нахождение максимально возможного числа составляющих (основной и дополнительной инструментальных, методической, взаимодействия, субъективной).

1.5.2. Многократные прямые измерения

В многократных (множественных) прямых измерениях получают ряд наблюдений (в общем случае различных) одной и той же физической величины. При этом возможны две постановки задачи.

Первая постановка задачи: измеряемая величина неизменна, а множество различных наблюдений (отдельных результатов измерения) вызваны, например, наличием у инструмента заметных случайных погрешностей. И тогда решаются вопросы, что принять за измеренное значение (за окончательный результат измерения) и как оценить суммарную погрешность результата.

Вторая постановка задачи: сама измеряемая величина случайна и тогда решается вопрос определения оценки математического ожидания этой случайной величины и оценки ее среднего квадратического отклонения.

Математический аппарат решения обеих задач фактически общий, однако существо постановки принципиально разное.

Рассмотрим только первый случай, как более распространенный в практике технических измерений. Допустим, имеем ряд наблюдений x_1, x_2, \dots, x_n , полученных одним прибором при измерении одной и той же неизменной величины X . Прибор имеет только случайную погрешность (его систематической погрешностью можно пренебречь, $\Delta_c = 0$). Тогда оценкой X^* истинного значения измеряемой величины, т.е. результатом измерения, следует считать среднее арифметическое всех исходных наблюдений x_i :

$$X^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Если же систематической погрешностью Δ_c пренебречь нельзя и ее значение, предположим, известно, то необходимо скорректировать полученный результат:

$$X^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - \Delta_c.$$

В случае, когда значение систематической погрешности Δ_c неизвестно задача не имеет корректного решения.

Мерой достоверности найденной оценки X^ служит оценка среднего квадратического отклонения σ^* этого среднего арифметического значения X^* :*

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X^*)^2}{n(n-1)}}.$$

Рассмотрим пример. Предположим, получен ряд наблюдений (результатов одиночных прямых измерений) действующего значения переменного напряжения U_i в электрической цепи вольтметром, имеющим заметную случайную погрешность:

Номер отсчета	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U_i , В	218	214	210	212	204	214	208	212	218	222	220	216

Предполагая, что у вольтметра есть только случайная погрешность (систематическая отсутствует, $\Delta_c = 0$), а измеряемая величина за время наблюдения не изменялась, можно найти оценку окончательного результата измерения X^* и оценку среднего квадратического отклонения σ^* этого результата.

В соответствии с приведенными выше выражениями вычислим искомые значения: $X^* = 214,0$ В; $\sigma^* = 1,5$ В. Для случая, например, нормального закона распределения случайной погрешности, задаваясь конкретным значением доверительной вероятности $P_{\text{дов}}$, можно легко найти абсолютную погрешность Δ . Так, при требуемой доверительной вероятности $P_{\text{дов}} = 0,95$ значение абсолютной погрешности составляет $\Delta = \pm 2 \cdot 1,5$ В = $\pm 3,0$ В, а для вероятности $P_{\text{дов}} = 0,997$ значение абсолютной погрешности составит $\Delta = \pm 3 \cdot 1,5$ В = $\pm 4,5$ В.

1.5.3. Обработка косвенных измерений

Косвенные измерения в практике электрических измерений встречаются довольно часто. Вопрос оценки погрешности результата измерения — один из важнейших в таких экспериментах. Имея подробную исходную информацию о применяемых средствах измерения, измеряемых величинах и условиях проведения эксперимента, можно достаточно строго решить задачу оценки суммарной погрешности результата измерения. Правда, требуется четко оговаривать все допущения. Возможны два подхода к решению этой задачи: детерминированный и вероятностный.

Первый подход (иногда называемый “методом *наихудшего случая*”) более характерен для обычных технических измерений и экспресс-измерений с их обычно упрощенными моделями процессов и подходами. Правда, *детерминированный подход дает в общем случае завышенное значение погрешности, но с доверительной вероятностью, равной единице* (т.е. дает 100 %-ную уверенность, что реальное фактическое значение общей погрешности ни при каких обстоятельствах не превзойдет найденного).

Перед рассмотрением детерминированного подхода оговорим необходимые допущения.

А. Инструменты исправны, имеют реальные погрешности, соответствующие своим классам точности. Причем, их погрешности — только систематические, т.е. не меняющиеся в течение данного эксперимента. Случайных погрешностей нет.

Б. Исходные измеряемые величины характеризуются неизменными (в течение данного эксперимента) значениями основных параметров.

В. Условия работы СИ нормальные или рабочие.

Г. Функциональная зависимость искомой величины Y от исходных величин X_i известна достаточно точно.

Д. Оператор имеет достаточную квалификацию.

Если интересующая нас величина Y связана с исходными величинами X_i известной функциональной зависимостью F :

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

и предельные значения абсолютных погрешностей Δ_i определения каждой исходной величины X_i известны, то предельное значение абсолютной погрешности Δ_Y результата измерения искомой величины Y в общем случае можно определить по так называемой формуле накопления частных погрешностей:

$$\Delta_Y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial X_i} \Delta_i,$$

где $(\partial F / \partial X_i)$ — частные производные функционала F по каждой исходной величине в точках, соответствующих найденным значениям величин X_i ; Δ_i — предельные значения абсолютных погрешностей определения исходных величин X_i .

Рассмотрим два частных, но довольно распространенных, случая функциональной зависимости F .

Первый частный случай — функционал F вида “сумма”. Если функциональная зависимость имеет вид:

$$Y = \sum_{i=1}^n a_i X_i,$$

где a_i — коэффициенты функциональной зависимости, то предельное значение абсолютной погрешности Δ_Y определяется так:

$$\Delta_Y = \sum_{i=1}^n a_i \Delta_i.$$

Относительная погрешность δ_Y при этом может быть найдена обычным образом:

$$\delta_Y = \frac{\Delta_Y}{Y} \cdot 100\%.$$

Например, если $Y = 5X_1 + 2X_2 + X_3$, то $\Delta_Y = 5\Delta_1 + 2\Delta_2 + \Delta_3$.

Второй частный случай — функционал F вида “произведение”. Если функциональная зависимость имеет вид:

$$Y = \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i}, \quad i = 1$$

где Π — знак произведения n сомножителей; α_i — коэффициенты — показатели степени исходных величин X_i ,

то предельное значение относительной погрешности δ_Y определяется так:

$$\delta_Y = \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta_i,$$

где δ_i — предельные значения относительных погрешностей определения исходных величин X_i .

Предельное значение абсолютной погрешности Δ_Y затем находится обычным образом:

$$\Delta_Y = \frac{\delta_Y Y}{100\%}.$$

Например, если функционал Y имеет вид:

$$Y = \frac{X_1^2 X_2^3}{X_3^5},$$

то значение относительной погрешности δ_Y равно:

$$\delta_Y = 2\delta_1 + 3\delta_2 + 5\delta_3.$$

И хотя формально третье слагаемое должно входить в сумму со знаком “минус”, но, поскольку предельные значения отдельных погрешностей практически всегда симметричны (\pm), то в худшем случае (самое неблагоприятное сочетание значений и знаков всех составляющих) предел общей погрешности — есть сумма модулей отдельных составляющих.

В отличие от допущений предыдущего подхода (детерминированного), в случае вероятностного подхода предполагается, что исходные измеряемые величины случайны (или погрешности их изме-

рения случайны), характеризуются неизменными (в течение данного эксперимента) значениями математических ожиданий и средних квадратических отклонений.

Если известна функциональная зависимость F :

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

где X_1, X_2, \dots, X_n — исходные случайные величины с известными математическими ожиданиями m_1, m_2, \dots, m_n и средними квадратическими отклонениями $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$

то во-первых, искомая величина Y , естественно, также случайна, и, во-вторых, можно оценить значения математического ожидания m_Y и среднего квадратического отклонения σ_Y искомой величины Y :

$$m_Y = F(m_1, m_2, \dots, m_n);$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{dF}{dX_i} \right)_{m_i}^2 \cdot \sigma_i^2},$$

где dF/dx_i — частные производные функционала F по каждой исходной величине в точках, соответствующих значениям их математических ожиданий m_i ; σ_i — средние квадратические отклонения величин X_i .

Зная закон распределения исходных величин, или, например, предполагая закон распределения искомой величины Y нормальным, можно, задаваясь определенным значением доверительной вероятности, оценить предельное значение абсолютной погрешности Δ_Y . Например, для случая нормального закона распределения при задаваемой доверительной вероятности $P = 0,95$; предельное значение абсолютной погрешности Δ_Y составит $\pm 2\sigma_Y$; для задаваемой вероятности $P = 0,997$ предел абсолютной погрешности Δ_Y составляет $\pm 3\sigma_Y$.

1.5.4. Пример расчета погрешности результата косвенного измерения

Рассмотрим пример расчета погрешности результата косвенного измерения активной мощности с помощью амперметра на нагрузке с известным значением сопротивления. При известных и постоянных значениях тока I в нагрузке и сопротивления R нагрузки активная мощность P определяется следующим образом:

$$P = I^2 R.$$

Значения величин I и R измеряют различными приборами со своими конкретными погрешностями, определяемыми, в частности, их классами точности. Погрешности этих исходных результатов можно найти на основе паспортных данных и показаний используемых приборов (амперметра и омметра).

Как показано ранее, для такого частного случая функциональной зависимости (функционал вида "произведение"), суммарная предельная относительная погрешность δ может быть найдена как сумма предельных относительных погрешностей определения значения каждой составляющей с учетом их вклада в функционал:

$$\delta = 2\delta_I + \delta_R.$$

Предположим, что предельные относительные погрешности определения исходных величин, найденные по результатам прямых измерений сопротивления и тока и паспортным данным приборов, равны, соответственно, $\delta_R = \pm 1\%$; $\delta_I = \pm 1,5\%$. Тогда суммарная предельная относительная погрешность δ результата косвенного измерения мощности P :

$$\delta = \pm (1 + 2 \cdot 1,5) \% = \pm 4 \%.$$

Абсолютная суммарная погрешность Δ при уже найденном результате вычисления мощности P может быть найдена обычным образом:

$$\Delta = (\delta P)/100 \%.$$

Так, если полученный результат косвенного измерения мощности, например, $P = 15$ Вт, то значение предельной абсолютной погрешности

$$\Delta = \pm (4 \cdot 15)/100 = \pm 0,6 \text{ Вт}.$$

Конечно, в общем случае необходимо учитывать не только инструментальные погрешности (погрешности собственно приборов), но и возможные методические.

ГЛАВА ВТОРАЯ

Основные характеристики электрических сигналов и цепей

Периодические сигналы электрических напряжений, токов, мощностей (как и некоторые элементы и характеристики электрических цепей) могут быть выражены числовыми значениями (параметрическое представление), а могут быть описаны функциями (функциональное представление). На рис. 2.1, а показан пример *параметрического* представления — показание индикатора цифрового мультиметра при измерении действующего значения сетевого напряжения, а на рис. 2.1, б — *функционального* представления — изображение кривой этого же сигнала напряжения на экране электронно-лучевого осциллографа.

Параметрическое представление характерно для статических (упрощенных) моделей объектов и процессов, а функциональное представление, наоборот, отражает динамические взгляды и подходы.

Рассмотрим некоторые основные параметры и характеристики периодических электрических сигналов и цепей.

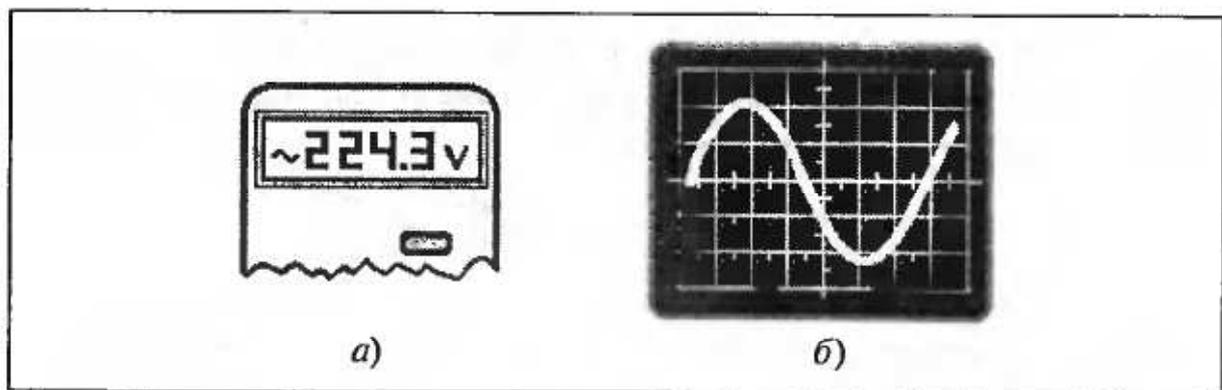


Рис. 2.1. Параметрическое и функциональное представления сигналов

2.1. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Рисунок 2.2 иллюстрирует некоторые основные параметры периодических сигналов. Периодические сигналы напряжения, тока и мощности характеризуются временными и амплитудными параметрами (параметрами уровня)

К первой группе — *временных параметров* относятся период T , частота сигнала f , фазовый сдвиг φ , а также связанные с ними параметры, например, круговая частота ω , а также $\cos \varphi$ (если речь идет о двух синусоидальных сигналах одной частоты).

Период T сигнала — длительность одного полного цикла изменения сигнала. Выражается в единицах времени — в секундах (с), миллисекундах (мс), микросекундах (мкс) и т.д.

Частота f сигнала — число периодов сигнала в единицу времени (чаще всего в секунду). Частота — это обратная периоду величина $f = 1/T$. Основная единица частоты — герц (Гц): $1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$. Кроме основной единицы используются кратные единицы: килогерц (кГц), мегагерц (МГц) и др. *В нашей стране номинальное значение час-*



Рис. 2.2. Параметрическое представление периодических сигналов

тоты электрической сети 50 Гц. При этом номинальное значение периода $T = 1/f = 1/50 \text{ Гц} = 0,02 \text{ с} = 20 \text{ мс}$.

Круговая (угловая) частота ω связана с частотой f таким соотношением: $\omega = 2\pi f$. Выражается в радианах в секунду (рад/с). Период T сигнала при этом $T = 360^\circ$ или $T = 2\pi$ радиан ($\pi \approx 3,14$).

Для периодических сигналов, близких по форме к прямоугольной, к временным параметрам относят также длительность импульса $\Delta t_{\text{и}}$ и скважность Q , как отношение периода сигнала T к длительности импульса $\Delta t_{\text{и}}$:

$$Q = T/\Delta t_{\text{и}}$$

К параметрам уровня (см. рис. 2.2) относятся максимальное (амплитудное, пиковое), среднее, среднее выпрямленное и среднее квадратическое (действующее, эффективное) значения сигнала. Из них самым важным и полезным для оценки особенностей электрического сигнала является среднее квадратическое (действующее, эффективное) значение — СКЗ (Root Mean Square — RMS), так как именно оно определяет способность совершать работу, действовать (нагревать, двигать, светить и т.п.). Большинство измерительных приборов, предназначенных для работы с периодическими напряжениями и токами, градуируют в средних квадратических (действующих) значениях для случая синусоидального сигнала.

К параметрам уровня относятся также коэффициенты амплитуды и формы, а также коэффициент гармонических искажений.

При использовании статических моделей процессов (в статических измерениях) все указанные параметры сигналов предполагаются неизменными во времени.

2.1.1. Напряжения и токи

Рисунок 2.3 иллюстрирует разницу в определении некоторых параметров уровня на примере периодического напряжения $u(t)$ с периодом T . Обозначения на рис. 2.3 следующие: U_m — амплитудное значение (максимальное, т.е. самое большое на периоде мгновенное значение); $U_{\text{с.к}}$ — среднее квадратическое (действующее, эффективное) значение; $U_{\text{с.в}}$ — среднее выпрямленное значение; $U_{\text{с}}$ — среднее значение.

Среднее значение

$$U_{\text{с}} = \frac{1}{T} \int u(t) dt.$$

Среднее значение периодического сигнала, не имеющего постоянной составляющей (довольно распространенный случай), равно нулю и, поэтому, не интересно.

Среднее выпрямленное значение

$$U_{с.в} = \frac{1}{T} \int |u(t)| dt.$$

Если функции периодических (необязательно синусоидальных) сигналов напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ известны, то усредненные на периоде T средние квадратические (действующие) значения напряжения $U_{с.к}$ и тока $I_{с.к}$ вычисляют так:

$$U_{с.к} = \sqrt{\frac{1}{T} \int u(t)^2 dt};$$

$$I_{с.к} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i(t)^2 dt}.$$

Все интервалы берутся на интервале одного периода.

2.1.2. Коэффициенты амплитуды и формы

Характер периодического сигнала, его форма, степень его несинусоидальности можно в простейшем виде оценить коэффициентами амплитуды k_a (Crest Factor — CF) и формы k_ϕ (см. рис. 2.3):

$$k_a = \frac{U_m}{U_{с.к}}; \quad k_\phi = \frac{U_{с.к}}{U_{с.в}}.$$

Синусоидальный сигнал имеет значения коэффициентов амплитуды и формы, соответственно, $k_a = \sqrt{2} = 1,41$; $k_\phi = 1,11$. А, например, для сигнала прямоугольной формы, симметричного относительно оси времени, значения обоих этих коэффициентов равны единице. Сигналы других форм могут иметь значения коэффициентов k_a и k_ϕ , сильно отличающиеся от указанных для синусоидального сигнала.

На рис. 2.4 приведены примеры некоторых простых форм сигналов и даны значения их коэффициентов амплитуды k_a . Периодические сигналы 1, 2, 3, 4 не имеют постоянной составляющей (Direct Current — DC). Сигналы 5, 6, 7, 8 — более сложные — содержат как переменную, так и постоянную составляющие.

Знание особенностей исследуемого сигнала, специфики электрической цепи, возможностей и характеристик используемых приборов, поможет избежать серьезных ошибок, при измерениях. При-

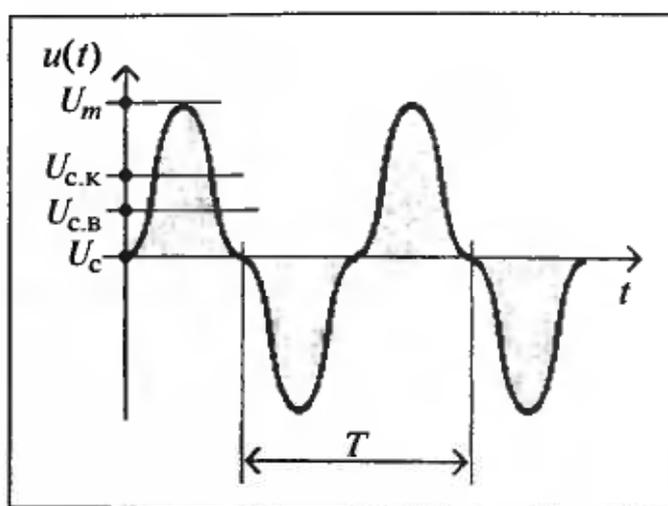


Рис. 2.3. Периодический сигнал

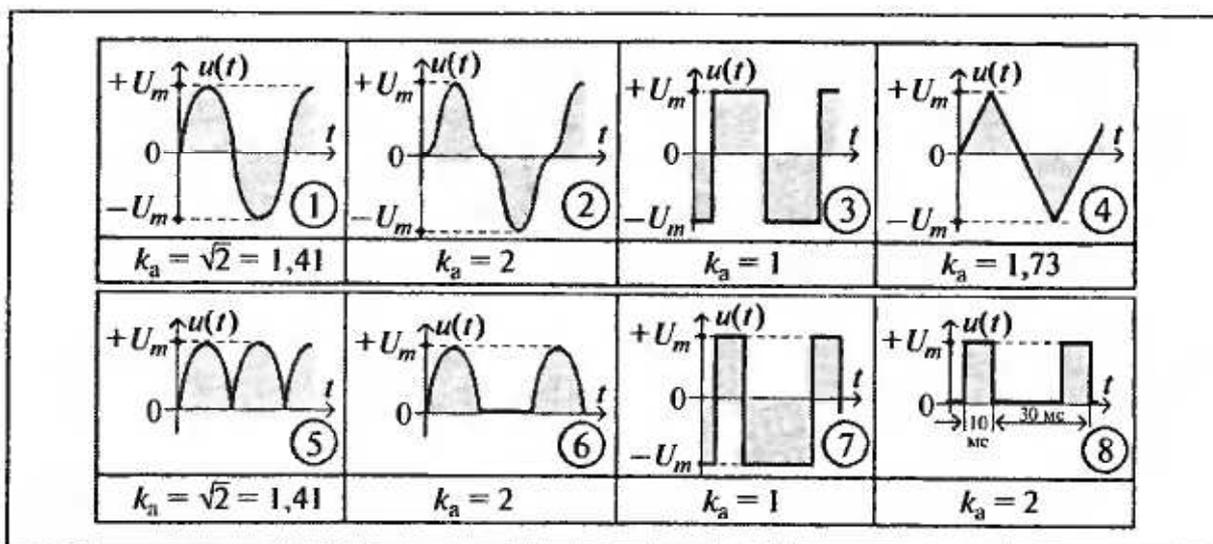


Рис. 2.4. Коэффициенты амплитуды k_a для сигналов разных форм

боры различных систем по-разному реагируют на периодические сигналы сложных форм. Например, типичный аналоговый универсальный измерительный прибор (тестер) содержит магнитоэлектрический измерительный механизм и полупроводниковый одно- или двухполупериодный выпрямитель, т.е. реагирует на средние выпрямленные значения переменных напряжений и токов, а не на *действующие*, как это чаще всего требуется. Такой измеритель дает удовлетворительные результаты измерения действующего значения только при форме сигналов, достаточно близкой к *синусоидальной* (случай 1 на рис. 2.4). А, например, в случае сигнала, похожего на *прямоугольный* (случай 3 на рис. 2.4), ошибка в определении действующего значения может составить около 10 % (и это без учета инструментальной и других погрешностей).

Еще одной возможностью охарактеризовать степень несинусоидальности (или степень искажения синусоидальности) периодических сигналов является использование понятия *коэффициента гармонических искажений* кривой напряжения или тока. Этот коэффициент говорит о том, насколько велик вклад высших (т.е. частоты, большей, чем основная) гармоник в искажение формы, выражается в процентах. Чем меньше значение этого коэффициента, тем лучше, тем ближе форма сигнала к синусоидальной. Для чисто синусоидального сигнала основной частоты значение этого коэффициента было бы равно нулю (подробнее см. ниже).

2.1.3. Коэффициент мощности и $\cos \varphi$

Два периодических сигнала одной частоты (например, напряжения и тока в цепи) могут быть сдвинуты во времени по отноше-

нию друг к другу на некоторый интервал Δt . Если сигналы синусоидальны, то можно говорить об угле сдвига фаз (фазовом сдвиге) φ (рис. 2.5).

Фазовый сдвиг φ измеряется обычно в градусах:

$$\varphi = \Delta t \cdot 360^\circ / T,$$

где Δt — временной сдвиг между сигналами; T — длительность периода.

Параметры $\cos \varphi$ и коэффициент мощности (Power Factor — PF) определяют эффективность преобразования, передачи и использования электрической энергии. Чем ближе к единице значения этих параметров, тем лучше (т.е. тем выше эффективность использования электрической энергии).

Формально понятие $\cos \varphi$ можно использовать только для синусоидальных сигналов. Однако на практике им часто пользуются в предположении, что форма реальных сигналов достаточно близка к синусоиде. Для более общего случая, т.е. для сигналов любых форм, применяется понятие коэффициента мощности PF, который определяется отношением активной мощности P к полной S . Коэффициент PF находится так:

$$PF = P/S = P/(U_{с.к} I_{с.к}).$$

Нагрузка в реальной электрической цепи не является ни чисто активной, ни чисто реактивной, а представляет собой комплексное сопротивление. Если нагрузка носит индуктивный характер (т.е. комплексное сопротивление нагрузки содержит активную и индуктивную составляющие), то синусоидальный ток в цепи отстает от приложенного синусоидального напряжения на некоторый угол φ , определяемый соотношением активной и индуктивной составляющих. При емкостном характере нагрузки ток в цепи опережает напряжение на угол, также зависящий от соотношения активной и емкостной составляющих. Именно угол φ определяет соотношение между активной и реактивной мощностями.

Чем ближе к нулю значение φ (т.е. чем ближе к единице значение $\cos \varphi$), тем лучше.

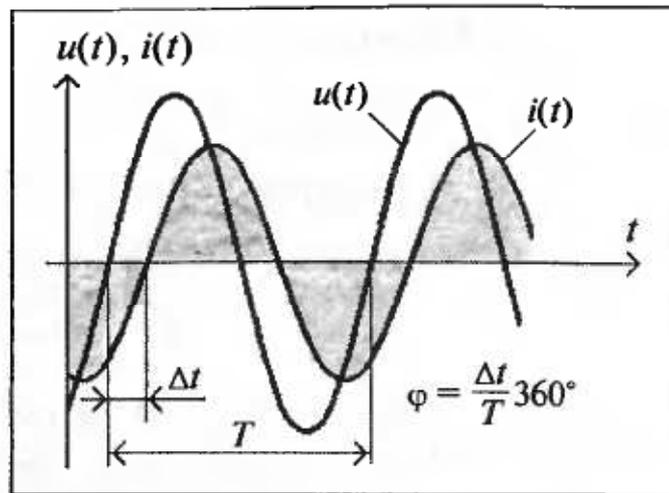


Рис. 2.5. Фазовый сдвиг

2.1.4. Мощность и энергия

Полная мощность S определяется произведением действующих значений напряжения $U_{с.к}$ и тока $I_{с.к}$ и равна геометрической сумме активной P и реактивной Q мощностей:

$$S = U_{с.к} I_{с.к};$$
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Активная мощность — это та полезная составляющая полной мощности, которая потребляется (безвозвратно) нагрузкой, в отличие от *реактивной мощности*, которая не потребляется, а (как правило) бесполезно “гуляет” в цепи. Например, в идеализированном случае чисто реактивной нагрузки (активной составляющей полного сопротивления нет, например, нагрузка — чистая индуктивность) в электрической цепи течет переменный ток, но энергия при этом не расходуется на полезную деятельность, а периодически преобразуется из электрической энергии в энергию магнитного поля. Реактивная мощность не только “не полезна”, но и может приводить к серьезным потерям. Значительная реактивная мощность требует большего сечения проводников, нагревает провода и контакты, сушит изоляцию.

В частном случае неизменных действующих значений синусоидальных напряжения $U_{с.к}$ и тока $I_{с.к}$, периода T , сдвига фаз φ между кривыми напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ активная P и реактивная Q мощности (как параметры, т.е. как числа), соответственно, равны:

$$P = U_{с.к} I_{с.к} \cos \varphi;$$

$$Q = U_{с.к} I_{с.к} \sin \varphi.$$

Если известны полная S и активная P мощности, реактивную мощность Q можно найти как геометрическая разность:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Активная мощность P при неизменных действующих значениях напряжения и тока в общем случае (для случая несинусоидальных, т.е. полигармонических сигналов) находится аналогично, но с учетом не $\cos \varphi$, а коэффициента мощности (Power Factor — PF):

$$P = U_{с.к} I_{с.к} PF.$$

Активная энергия W (как число), потребленная на некотором интервале $\Delta t = t_2 - t_1$, есть определенный интеграл функции мощности $p(t)$:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt.$$

В частном случае постоянной (т.е. неизменного значения) на некотором интервале Δt мощности P , потребленная активная энергия W определяется простым произведением:

$$W = P\Delta t.$$

2.2. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Периодический сигнал $x(t)$ любой формы можно функционально представить по-разному, т.е. в различных областях. Чаще других применяют представление сигналов во временной (в которой сигнал представлен функцией времени) и в частотной (в которой сигнал представлен функцией частоты) областях.

В каждой из этих областей возможны *аналитическое* или *графическое* представление. Например, во временной области (наиболее привычной и потому наиболее распространенной) чисто синусоидальный (моногоармонический) сигнал $x(t)$ можно представить аналитически функцией $x(t)$ таким образом:

$$x(t) = X_m \sin \omega t,$$

где X_m — амплитудное значение сигнала; ω — круговая частота сигнала, $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$; t — текущее время.

Графическое представление во временной области — это изображение сигнала в виде графика изменения его мгновенных значений во времени.

2.2.1. Напряжения и токи

Для случая двух синусоидальных сигналов одной частоты, например напряжения и тока в электрической цепи, функциональное представление во временной области выглядит так:

$$u(t) = U_m \sin \omega t,$$

$$i(t) = I_m \sin (\omega t + \varphi),$$

где φ — фазовый сдвиг функции тока относительно функции напряжения.

На рис. 2.6 приведена иллюстрация функционального представления синусоидального сигнала напряжения $u(t)$ во временной и частотной (спектральной) областях.

Временная и частотная (спектральная) области представления периодического сигнала связаны прямым и обратным преобразованиями Фурье (ПФ) — Fourier Transform. Прямое ПФ позволяет, зная временную функцию сигнала $x(t)$, определить его спектр $S(f)$:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt.$$

Обратное ПФ — наоборот, дает возможность, зная спектр сигнала $S(f)$, найти временное представление (функцию) самого сигнала $x(t)$:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f)e^{j2\pi ft} df.$$

Понимая, что полноценное спектральное представление сигнала содержит амплитудный и фазовый спектр, здесь и далее будем говорить только об амплитудном спектре.

Спектральный состав напряжений и токов — одна из важных характеристик сигнала, например, при оценке качества электроэнергии и/или особенностей отдельных потребителей. Он отражает для про-

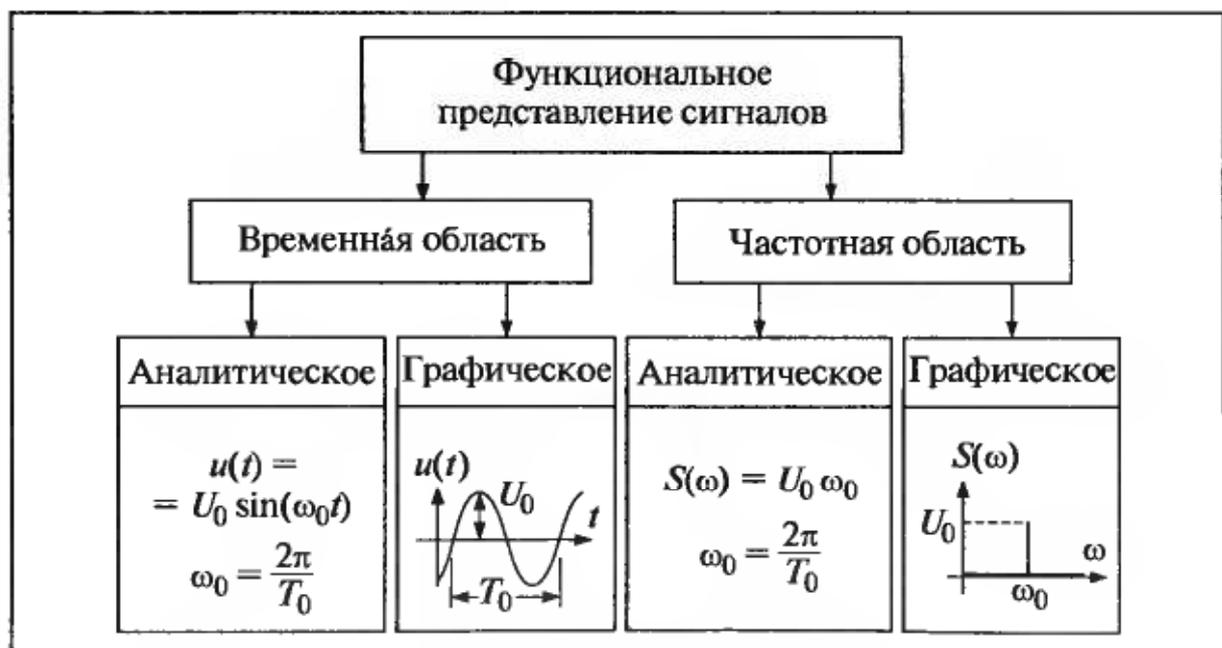


Рис. 2.6. Функциональное представление периодического сигнала напряжения во временной и частотной областях

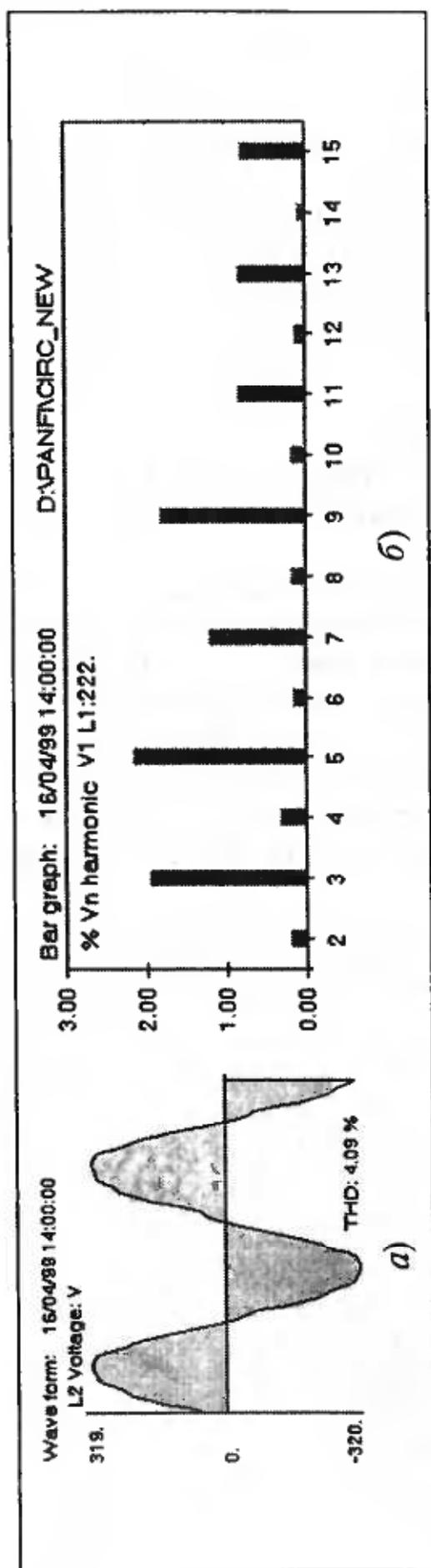


Рис. 2.7. Искажения форм сигнала и его спектральный состав

мышленных цепей 220 В/50 Гц наличие и вклад (обычно в действующих значениях) гармоник более высокой частоты, чем основная — 50 Гц.

На рис. 2.7 показаны диаграммы реального сигнала периодического напряжения силовой сети как во временной (рис. 2.7, а), так и в частотной (спектральной, рис. 2.7, б) областях. На рис. 2.7, б по оси абсцисс — номера гармоник. Первая (основная) гармоника, номинальная частота которой равна 50 Гц, на рис. 2.7, б не показана.

На рис. 2.7, б показан спектральный состав до 15-й гармоники, т.е. до гармоники с частотой $15 \cdot 50 = 750$ Гц. В данном случае искажения формы сигнала определяются в основном значительными по мощности нечетными гармониками (3, 5, 7-й и т.д.). Чисто синусоидальный сигнал содержал бы только одну (основную — 50 Гц) гармонику. Спектр в этом (идеальном) случае не содержал бы никаких гармоник, кроме, естественно, основной (50 Гц).

2.2.2. Мощность и энергия

Мощность, как и напряжение, и ток, также можно представить либо числом, либо функцией времени. Мощность как число (для действующих значений) $P = UI \cos \varphi$.

Мощность как функция времени $p(t)$ есть произведение перио-

дических функций напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ одной частоты:

$$p(t) = u(t)i(t).$$

Причем, частота этой также периодической функции $p(t)$ вдвое выше частоты исходных сигналов (рис. 2.8).

В общем случае усредненная на периоде T активная мощность P (как число) есть интеграл за период T функции $p(t)$ или интеграл произведения функций напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt.$$

Графическая иллюстрация поведения мощности $p(t)$ (функции времени) в зависимости от изменения фазового сдвига φ (для синусоидальных сигналов) показана на рис. 2.9.

При нулевом значении φ (что соответствовало бы идеальному варианту — чисто активной нагрузке) активная мощность P максимальна, а реактивная мощность Q отсутствует (рис. 2.9, а). Чем больше фазовый сдвиг φ , тем хуже соотношение между активной и реактивной составляющими общей мощности, тем ниже эффективность использования энергии. Например, если представить чисто индуктивную нагрузку (ток отстает от напряжения на $\varphi = 90^\circ$), то в этом случае активная мощность $P = 0$, а реактивная Q максимальна (рис. 2.9, в).

Активная мощность тоже может быть функцией времени $p(t)$.

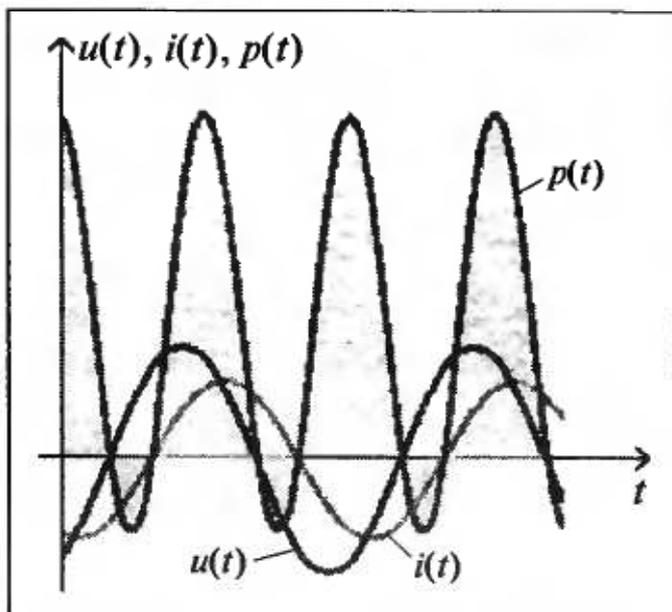


Рис. 2.8. Мощность — функция времени $p(t)$

Например, если несколько потребителей электроэнергии (от одного источника) периодически включаются и/или отключаются (рис. 2.10, а), то, естественно, суммарная активная мощность $p(t)$ будет меняться (рис. 2.10, б).

Активная энергия, как и другие рассмотренные величины, также может быть представлена функцией времени $w(t)$ (рис. 2.10, б). Если известно как ведет себя функция активной мощности $p(t)$, и на неко-

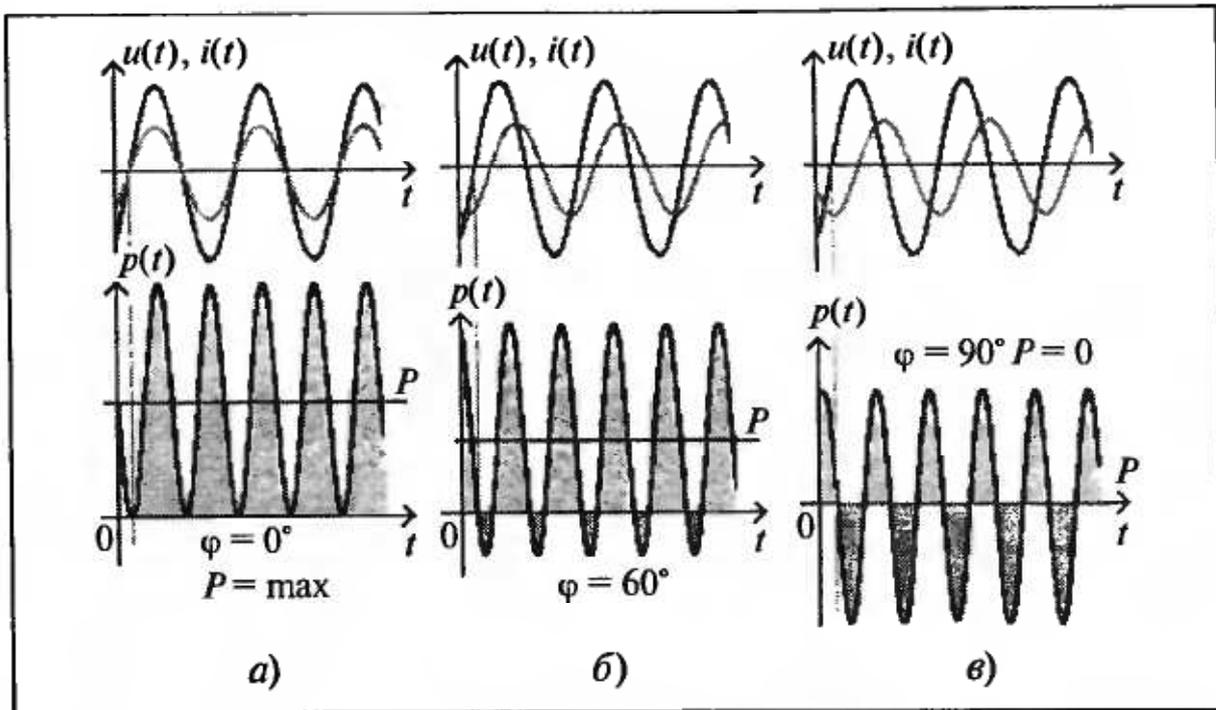


Рис. 2.9. Зависимость активной мощности от угла сдвига фаз

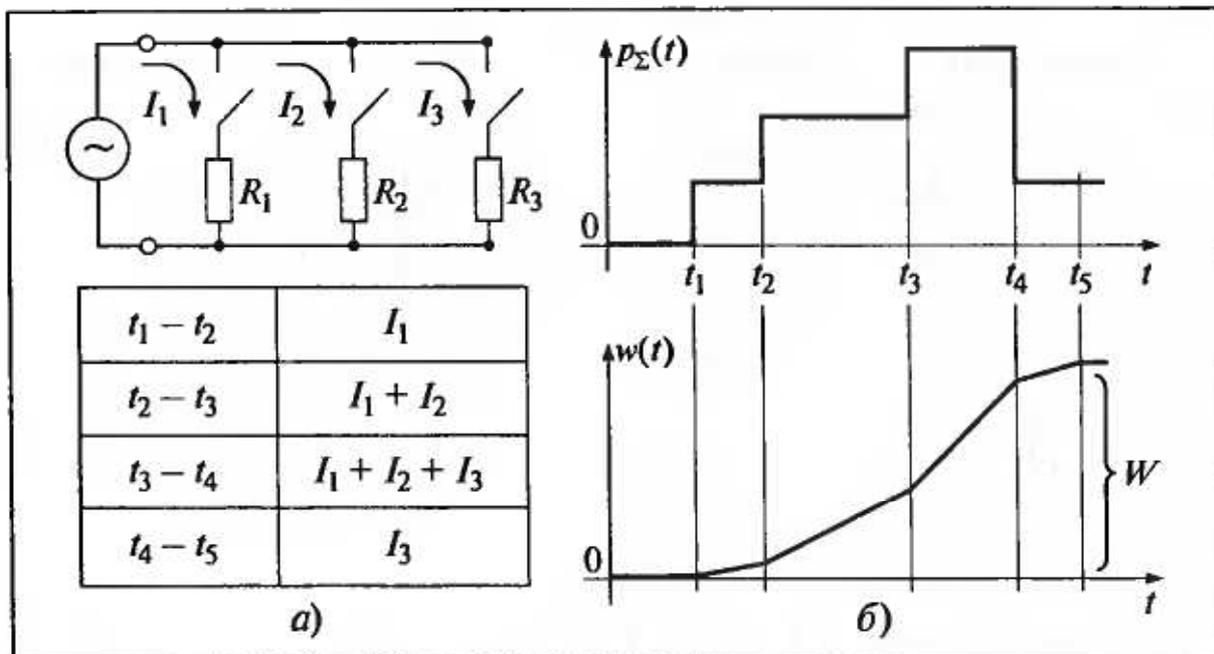


Рис. 2.10. Мощность и энергия

торых интервалах времени Δt_i ее значения известны и постоянны, то активную энергию W , потребленную на интервале $t_5 - t_1$, можно найти как сумму произведений $p_i \Delta t_i$ (рис. 2.10, б):

$$W = \sum_{i=1}^n p_i \Delta t_i.$$

В общем случае, если функция активной мощности $p(t)$ известна, то энергия W , потребленная на некотором интервале $t_1 - t_0$, определяется так:

$$W = \int_{t_0}^{t_1} p(t)dt.$$

2.2.3. Коэффициент мощности и $\cos \varphi$

В реальных технологических процессах при обычно изменяющейся во времени нагрузке (включение и отключение нескольких различных потребителей электроэнергии) коэффициент мощности PF (или $\cos \varphi$), естественно, меняется во времени и тоже может быть представлен функцией времени $PF(t)$. На рис. 2.11 приведен пример реальной диаграммы, зарегистрированной на вводно-распределительном устройстве механического цеха промышленного предприятия в течение суток. Значения функции коэффициента мощности $PF(t)$ менялись в довольно широком диапазоне от 1,0 до 0,23.

Отрицательные значения коэффициента мощности PF означали бы емкостной характер нагрузки. Напомним, что, чем ближе значение PF к единице, тем лучше. При чисто активных потребителях (идеализированный вариант) значение этого коэффициента было бы равно единице.

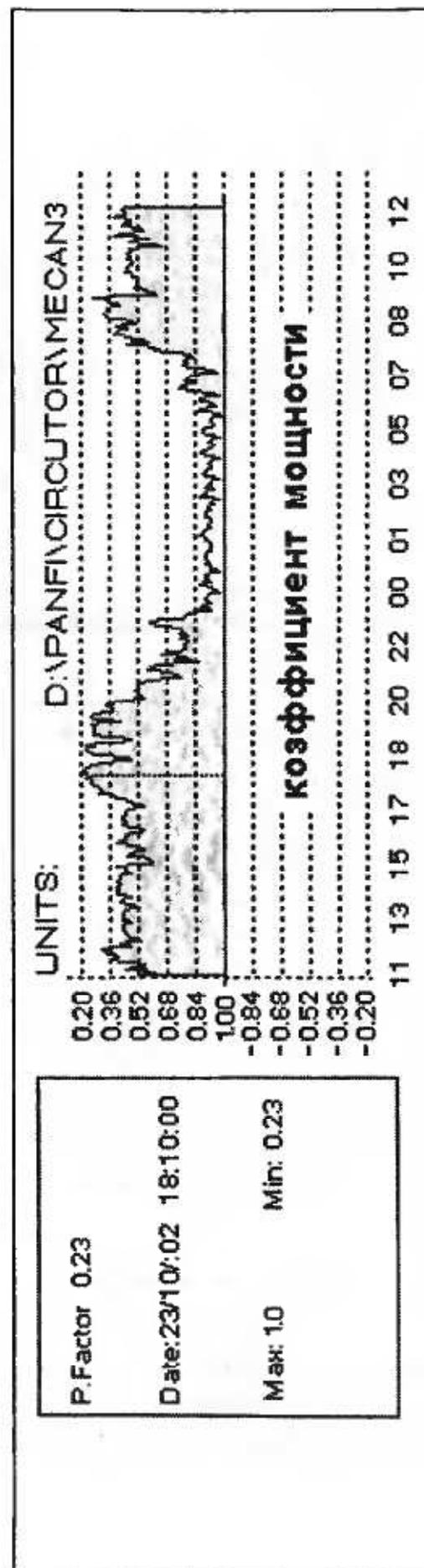


Рис. 2.11. Изменение коэффициента мощности

2.3. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

В основе современной электроэнергетики лежат принципы трехфазного генерирования, передачи, преобразования и потребления электрической энергии.

2.3.1. Напряжения и токи в трехфазной цепи

В трехфазных цепях используют три периодических напряжения синусоидального характера одной частоты (50 Гц), которые сдвинуты друг относительно друга на $1/3$ периода T , т.е. на 120° . Временные диаграммы фазных напряжений и токов приведены на рис. 2.12: первая фаза — A ; вторая фаза — B ; третья — C .

Наиболее общий случай — четырехпроводное подключение трехфазной нагрузки (нагрузка типа “звезда”) к трехфазной сети — показан на рис. 2.13.

Напряжения между нейтральным проводом N и линейными проводами (U_A, U_B, U_C) называют фазными (U_ϕ), а напряжения между

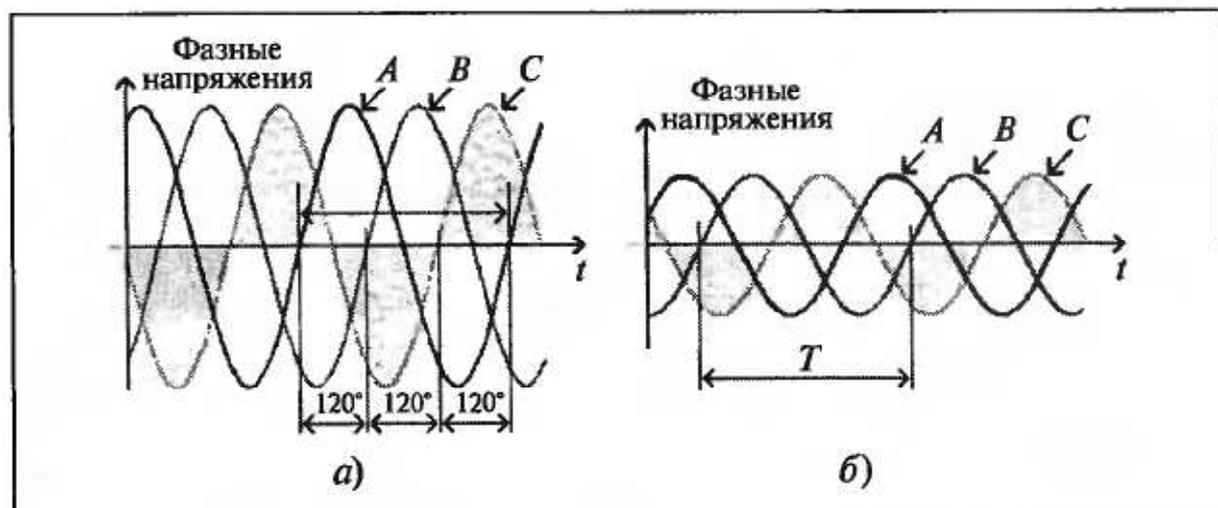


Рис. 2.12. Временные диаграммы фазных напряжений и токов

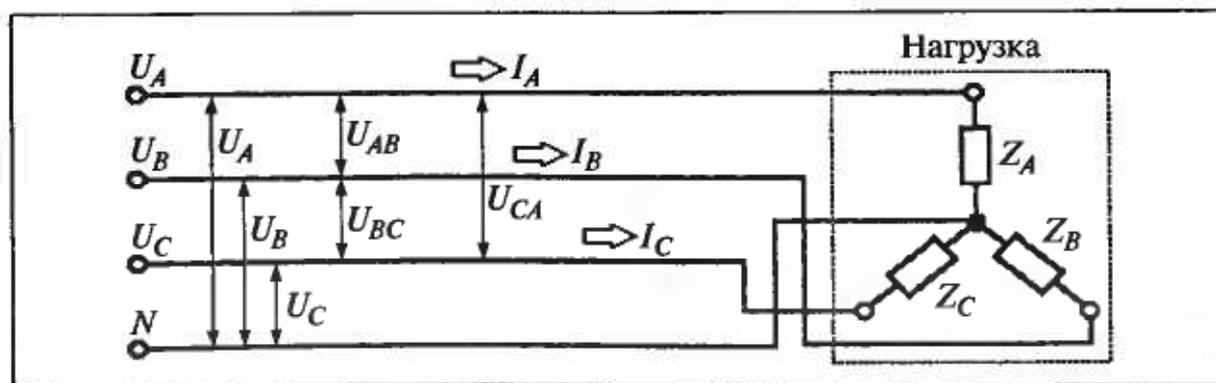


Рис. 2.13. Фазные и линейные напряжения и токи

линейными проводниками U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} — линейными ($U_{л}$) или междуфазными. В случае симметричных цепей соотношения между этими напряжениями следующее:

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}, \quad U_{\phi} = U_{л}/\sqrt{3}.$$

В симметричной схеме комплексные сопротивления нагрузки всех фаз Z_A , Z_B , Z_C одинаковы, все фазные напряжения одинаковы, все фазные токи одинаковы, все сдвиги фаз одинаковы:

$$U_A = U_B = U_C = U_{\phi} = U_{л}/\sqrt{3}, \quad I_A = I_B = I_C = U_{\phi}/Z_{\phi}.$$

2.3.2. Мощность и энергия в трехфазной цепи

Если цепь симметрична и напряжения синусоидальны, то суммарные активная P , реактивная Q и полная S мощности определяются утроенными значениями соответствующих фазных (равных) мощностей:

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \cos \varphi;$$

$$Q = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \sin \varphi;$$

$$S = 3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}U_{л}I_{л}.$$

При этом значение $\cos \varphi$ есть отношение активного сопротивления R_{ϕ} комплексной фазной нагрузки к ее полному сопротивлению Z_{ϕ} :

$$\cos \varphi = R_{\phi}/Z_{\phi}.$$

В общем случае суммарная активная мощность P_{Σ} потребления трехфазного приемника, если известны активные мощности всех фаз P_1 , P_2 , P_3 равна сумме:

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3.$$

Суммарная активная энергия W_{Σ} , потребленная на некотором интервале $\Delta t = t_1 - t_0$, есть определенный интеграл функции суммарной мощности $P_{\Sigma}(t)$:

$$W_{\Sigma} = \int_{t_0}^{t_1} P_{\Sigma}(t) dt.$$

В частном случае постоянной на некотором интервале Δt мощности P_{Σ} , потребленная активная энергия W_{Σ} определяется простым произведением:

$$W_{\Sigma} = P_{\Sigma} \Delta t.$$

2.4. КОМПЛЕКСНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Важным понятием в электроэнергетике, электротехнике, электрических измерениях является понятие комплексного сопротивления Z .

Реальные нагрузки в электрических цепях переменного тока не бывают чисто активными или чисто реактивными. Детальная эквивалентная схема любого реального электрического устройства содержит как активные, так и реактивные элементы. Например, обмотка обычного трансформатора как минимум состоит из активной и индуктивной составляющих.

Дальнейшее изложение будем вести для случая синусоидальных сигналов. В общем случае любая нагрузка Z может быть представлена вектором (рис. 2.14), проекция которого на действительную ось (Re — Real) есть активная составляющая R комплексного сопротивления. Проекция этого вектора на мнимую ось (Im — Imaginary) есть реактивная составляющая jX :

$$\vec{Z} = \text{Re} + j\text{Im} = R + jX.$$

Скалярное значение комплексного сопротивления Z определяется геометрической суммой активной и реактивной составляющих:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

2.4.1. Фазовый сдвиг

“Комплексность” (векторность) сопротивления нагрузки Z приводит к фазовому сдвигу между периодическими напряжениями и токами в нагрузке, значение которого зависит от количественного соотношения между активной и реактивной составляющими, а также от частоты сигналов.

На рис. 2.15 приведены некоторые наиболее распространенные примеры простых эквивалентных схем комплексных сопротивлений активно-индуктивного (рис. 2.5, а) и активно-емкостного (рис. 2.15, б, в) характеров. В первом случае ток $i(t)$ в нагрузке отстает от напряжения $u(t)$ на угол φ , во втором и третьем случаях — опережает напряжение.

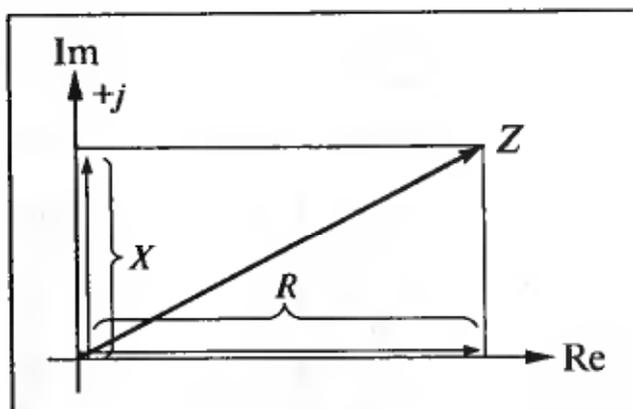


Рис. 2.14. Векторное представление комплексной величины Z

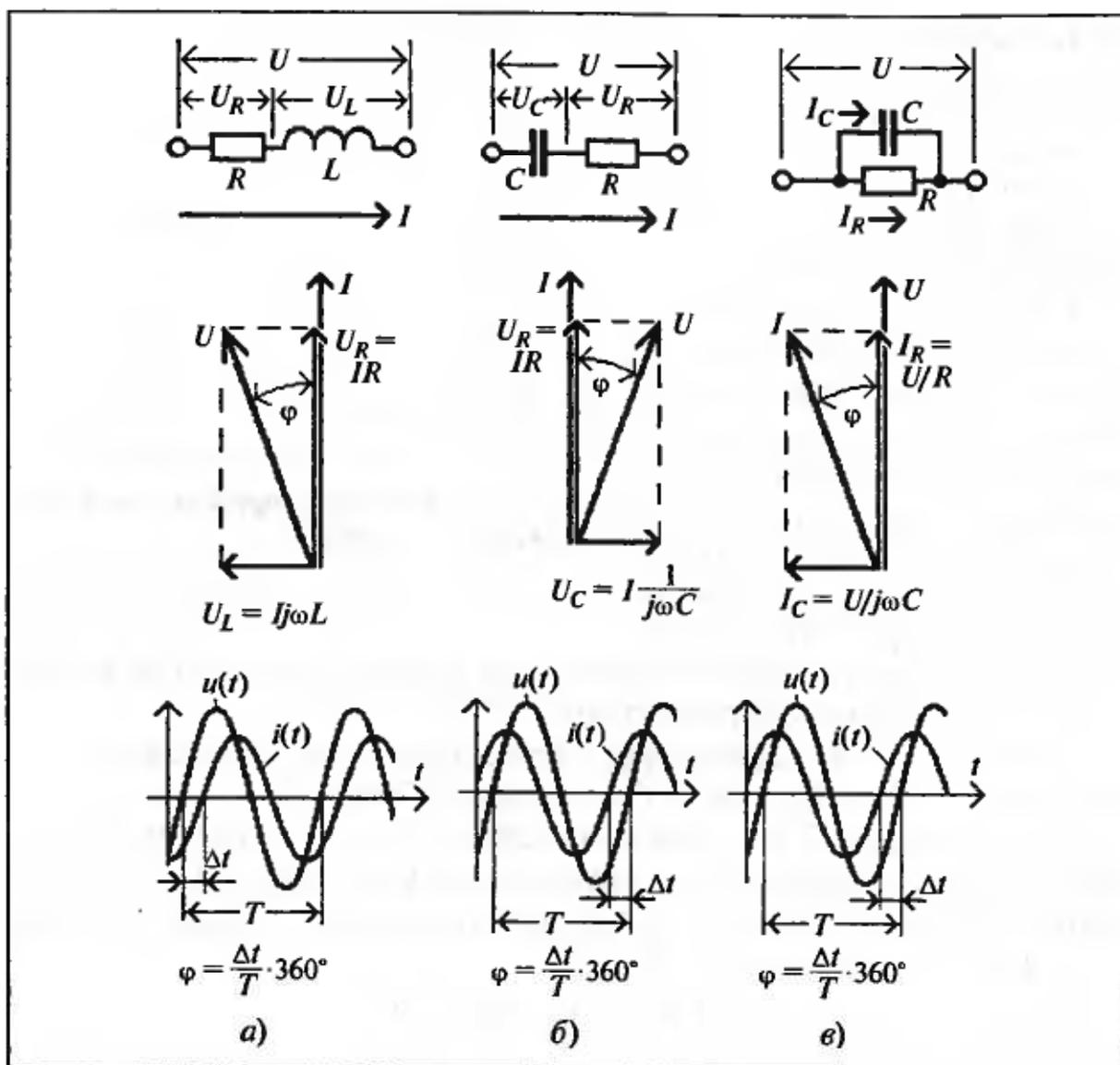


Рис. 2.15. Фазовые сдвиги напряжений и токов

Обозначения на рис. 2.15 следующие: R , L и C — значения, соответственно, активного сопротивления, индуктивности и емкости комплексного сопротивления нагрузки Z ; ω — круговая частота ($\omega = 2\pi f$); T — период переменного напряжения; Δt — временной сдвиг между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$; φ — фазовый сдвиг.

2.4.2. Добротность и тангенс угла потерь

Для оценки близости комплексных сопротивлений к “чистым” реактивностям (чистой индуктивности или чистой емкости) используют понятия “добротность” Q и “тангенс угла потерь” $\operatorname{tg} \delta$. Чем больше численное значение добротности Q (или, чем меньше $\operatorname{tg} \delta$), тем ближе комплексное сопротивление к идеальной реактивности. Например, для эквивалентной схемы комплексного сопротивления

индуктивного характера (рис. 2.15, а), чем больше значение добротности Q (или, что то же, чем меньше значение $\operatorname{tg} \delta$), тем ближе комплексное сопротивление к идеальной индуктивности.

Для *последовательных* эквивалентных схем (как, например, на рис. 2.15, а и б) добротность, Q определяется отношением реактивной X составляющей комплексного сопротивления к его активной R составляющей $Q = X/R$. При этом тангенс угла потерь есть обратная величина $\operatorname{tg} \delta = 1/Q = R/X$. Напомним, что реактивное сопротивление индуктивности $X_L = j\omega L$, а для емкости $X_C = 1/j\omega C$.

Для *параллельных* эквивалентных схем (как, например, на рис. 2.15, в) добротность Q определяется отношением активной составляющей комплексного сопротивления к его реактивной составляющей $Q = R/X$. При этом тангенс угла потерь также есть обратная величина $\operatorname{tg} \delta = 1/Q = X/R$.

Отметим, что значения добротности Q и тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ не являются постоянными параметрами комплексного сопротивления, а зависят от частоты ω напряжения (или тока).

2.5. НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ ФОРМЫ СИГНАЛА

Реальные формы напряжений и токов не являются синусоидальными, а в той или иной степени искажены. Искажения определяются присутствием в сигналах гармоник, т.е. других синусоидальных сигналов, частота которых выше основной. Чем значительнее амплитуды этих гармоник, тем сильнее искажения. Конкретная форма сигнала определяется суммой всех гармоник с учетом их фазовых сдвигов.

Искажение формы сигналов также может характеризоваться или параметрически (числом), или функцией времени и/или частоты.

2.5.1. Параметрическое представление

Действующее значение U полигармонического (т.е. содержащего много отдельных гармоник) сигнала есть геометрическая сумма действующих значений всех гармоник. Например, общее действующее значение несинусоидального сигнала напряжения находится так:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2},$$

где U_0 — значение постоянной составляющей (если она присутствует); U_1, U_2, \dots, U_n — действующие значения, соответственно, первой, второй, ..., n -й гармоник.

Количественно искажения могут быть интегрально оценены значением *коэффициента несинусоидальности* формы кривой (коэффици-

ентом *искажения синусоидальности*, коэффициентом общих гармонических искажений — Total Harmonic Distortion — THD). Этот коэффициент выражается несколько по-разному в разных стандартах. В международном стандарте IEC 555 и ряде национальных стандартов значение THD определено как отношение геометрической суммы действующих значений всех гармоник (кроме первой — основной) до некоторого номера n (например, до 15-й или до 40-й) к геометрической сумме действующих значений всех гармоник (включая первую). Иногда несинусоидальность формы оценивают коэффициентом гармонических искажений (КГИ) — отношением геометрической суммы действующих значений всех гармоник (кроме первой — основной) до некоторого номера n к действующему значению основной (первой) гармоники.

В соответствии с ГОСТ 13109-97 “Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения” допускается также определять коэффициент несинусоидальности K_U отношением геометрической суммы действующих значений всех гармоник, начиная со второй, к номинальному действующему значению фазного напряжения $U_{ном}$.

При любом варианте задания несинусоидальности коэффициенты, характеризующие искажения, выражаются в процентах.

Заметим, что числовое значение коэффициента несинусоидальности

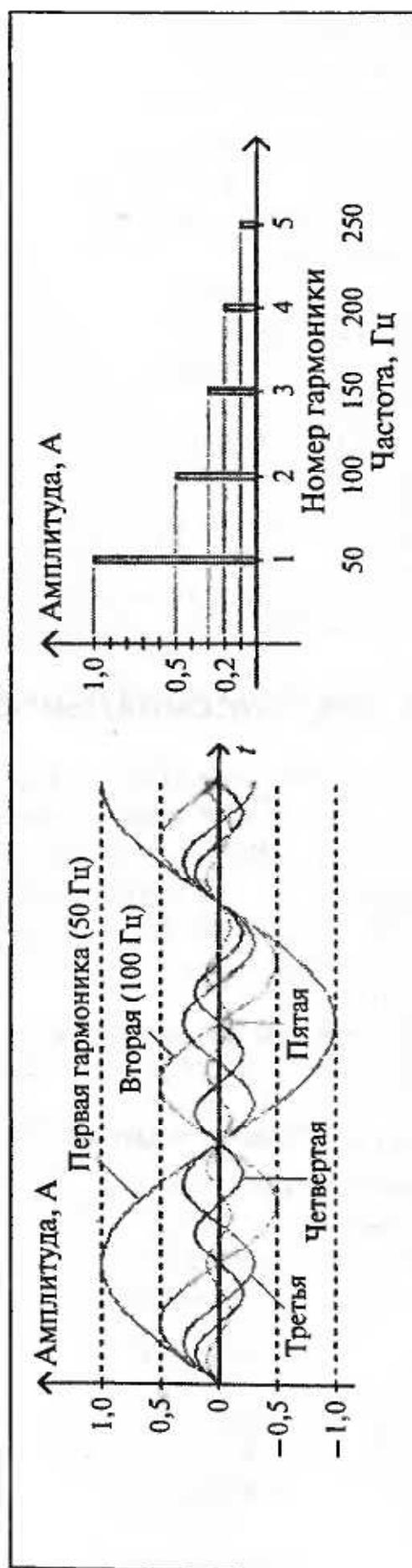


Рис. 2.16. Набор гармоник и амплитудный спектр сигнала

кривой (коэффициента гармонических искажений или THD) не позволяет судить о конкретной форме сигнала, а говорит только о количественном вкладе высших гармоник.

2.5.2. Функциональное представление несинусоидальности

Как мы уже отмечали, несинусоидальность формы тока и напряжения объясняется тем, что сигналы являются суммой нескольких гармоник (синусоид) различных частот и амплитуд. Чем больше этих составляющих и, чем больше их амплитуда, тем значительнее искажения. Идеальный (синусоидальный) сигнал состоял бы только из одной гармоники — первой (основной).

На рис. 2.16, а приведен пример гармонического состава (набора из пяти исходных гармоник) сигнала тока.

Значения частот гармоник, соответственно, равны: первая (основная) — 50 Гц, вторая — 100 Гц, третья — 150 Гц, четвертая — 200 Гц, пятая — 250 Гц. Амплитуды гармоник, соответственно, равны: первая (основная) — 1,0 А, вторая — 0,5 А, третья — 0,3 А, четвертая — 0,2 А, пятая — 0,1 А. На рис. 2.16, б изображен амплитудный спектр этого сигнала. Конкретная форма сигнала определяется простым суммированием синхронных текущих мгновенных значений всех исходных гармоник. В данном случае, т.е. при таком наборе гармоник и таком варианте их фазовых сдвигов, форма сигнала выглядит так, как показано на рис. 2.17.

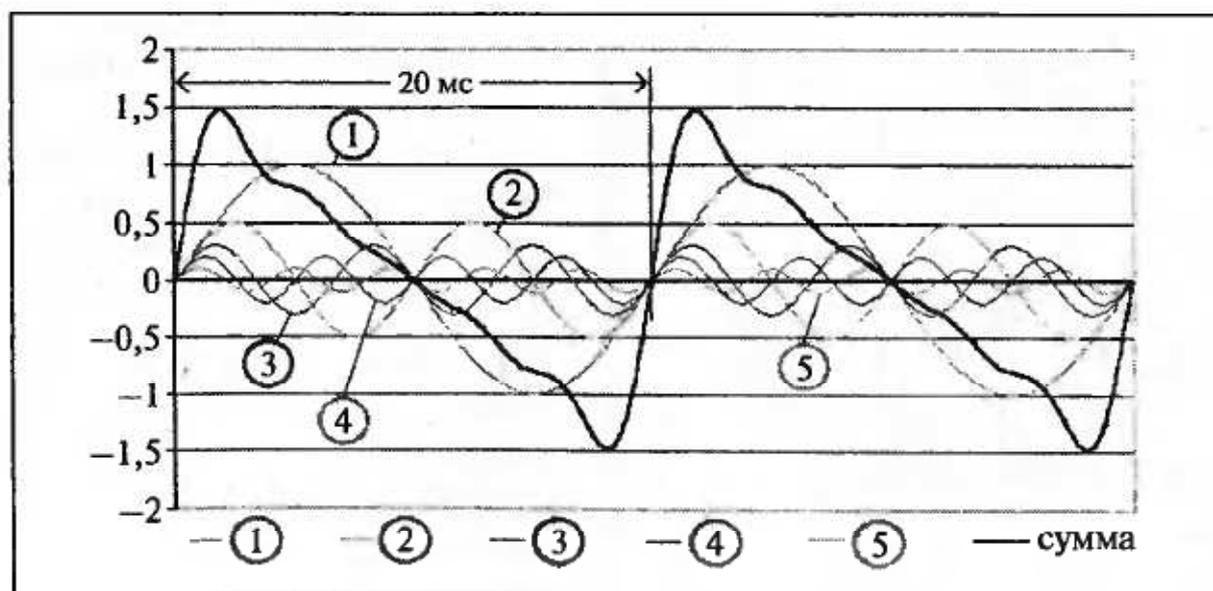


Рис. 2.17. Сигнал — сумма пяти гармоник

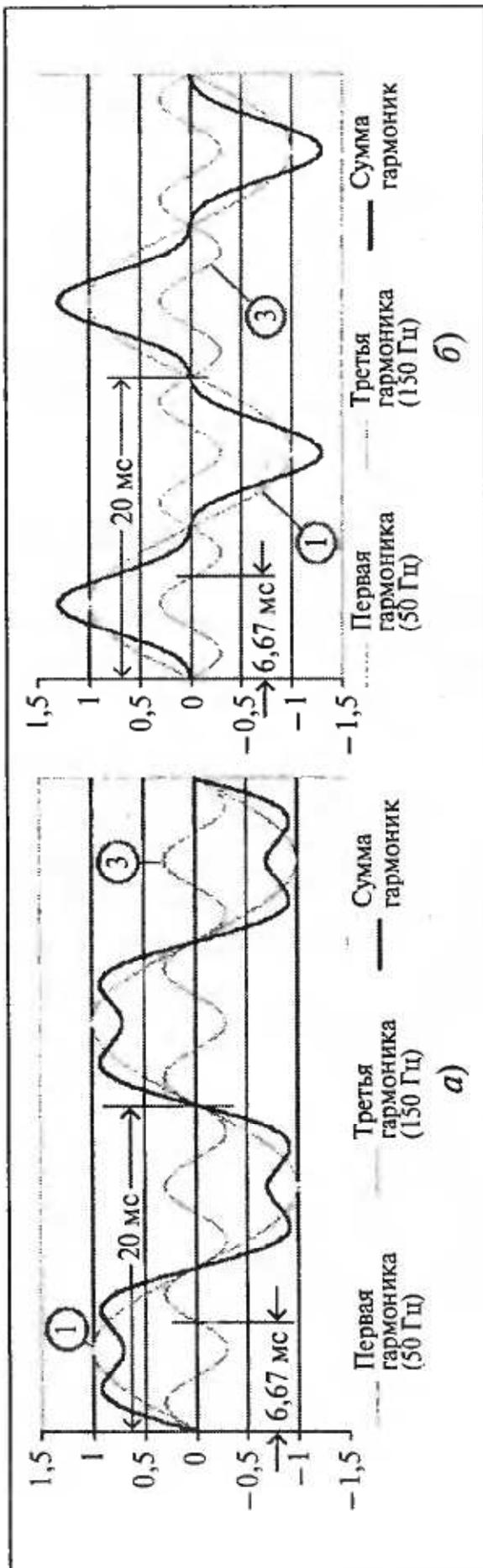


Рис. 2.18. Сигнал — сумма двух (1-й и 3-й) гармоник

Примеры сигналов тока, содержащих две гармоники: первую (основную) частотой 50 Гц и амплитудой 1,0 А; и третью, частотой 150 Гц и амплитудой 0,3 А, приведены на рис. 2.18, а и б.

Различия в формах суммарных сигналов, состоящих из совершенно одинаковых комплектов гармонических составляющих (например, рис. 2.18) вызваны различием начальных фаз исходных гармоник, т.е. разным временным расположением гармоник. Таким образом, конкретная несинусоидальность (искажение формы) сигналов определяется не только числом исходных гармоник, их амплитудами и частотами, но и начальным фазовым сдвигом, т.е. их фазовым спектром.

Представление гармонического состава несинусоидального сигнала возможно в виде столбчатого графика (Bar Graph), либо в виде таблицы чисел (Numerical) действующих значений отдельных гармоник. Пример графического представления реальных амплитудных спектров сигналов напряжения и тока в трехфазной цепи, полученных с помощью микропроцессорного регистратора/анализатора и специализированного программного обеспечения, приведен на рис. 2.19. По оси абсцисс приведены номера гар-

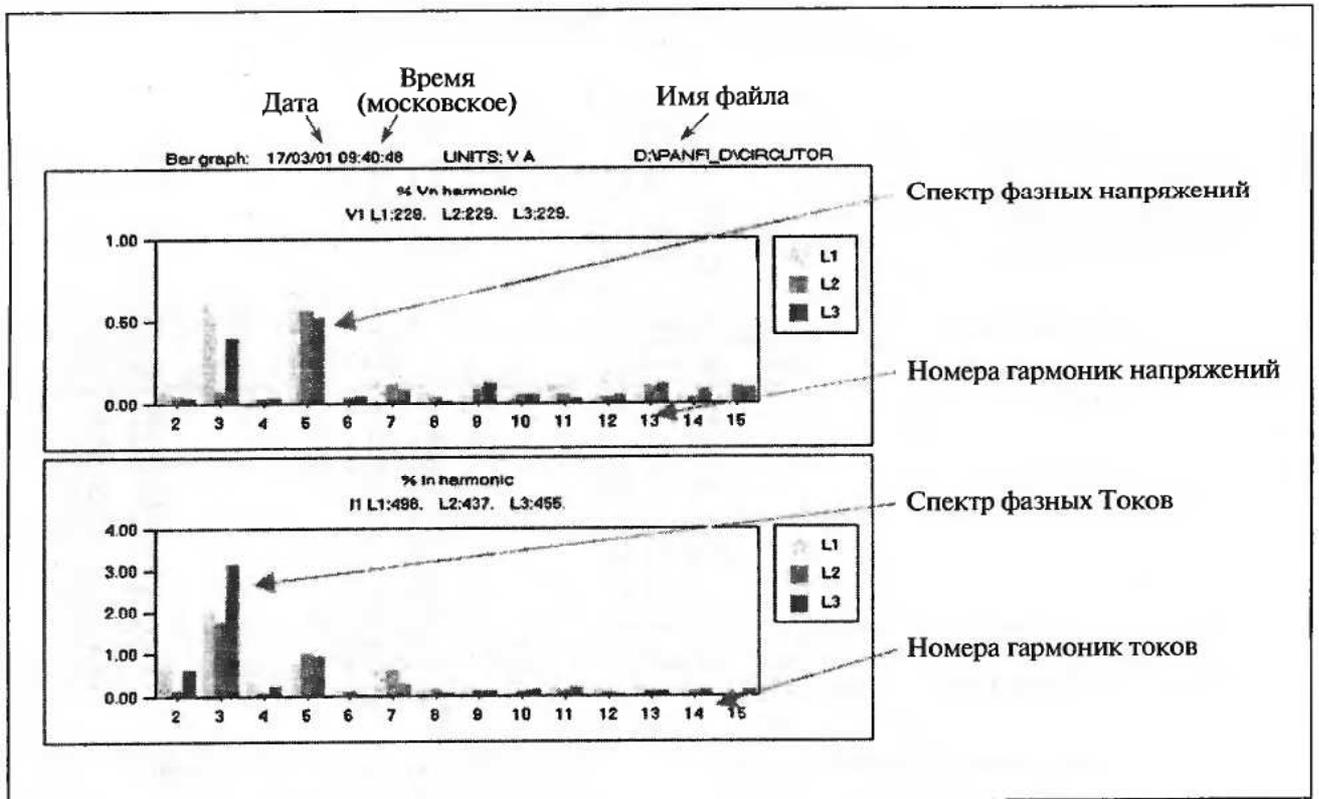


Рис. 2.19. Графики амплитудных спектров напряжений и токов

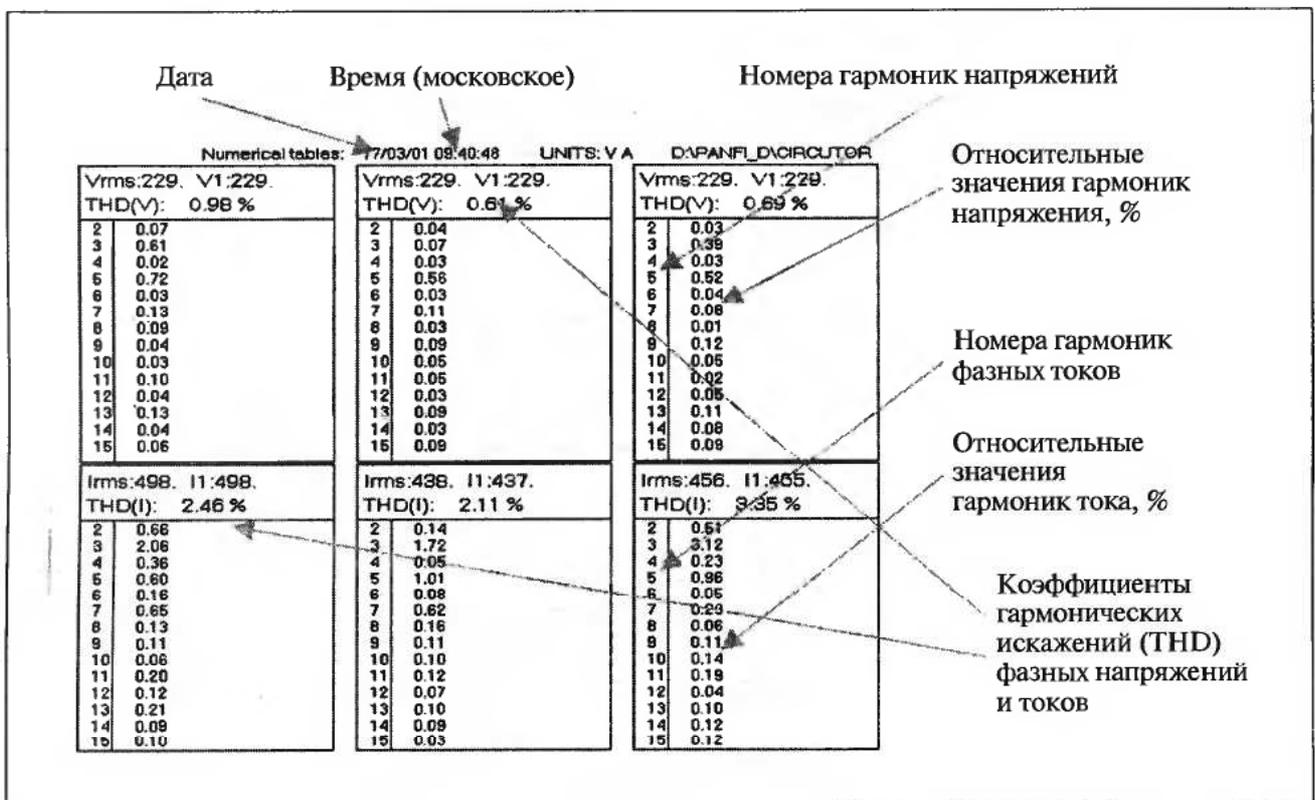


Рис. 2.20. Табличное представление спектрального состава напряжений и токов

моник (начиная со 2-й и до 15-й), по оси ординат — процентный вклад гармоник в общее действующее значение сигнала.

На рис. 2.20 приведен пример табличного представления спектрального состава тех же, что и на предыдущем рисунке, зарегистрированных сигналов напряжения и тока трехфазного потребителя. На рис. 2.20 представлены действующие значения отдельных гармоник в процентах от общего действующего значения несинусоидального (суммарного) сигнала.

2.6. Качество электроэнергии

Качество электроэнергии определяет возможности технологического процесса (особенно, при применении высоких технологий), производительность оборудования, устойчивость и надежность его работы, общие потери энергии и затраты, и в итоге — качество и стоимость продукции объекта. В некоторых случаях при ухудшении качества электроэнергии возможны аварии и, как следствие, значительный ущерб производству или объектам ЖКХ.

Различные виды электрооборудования по-разному реагируют на искажения напряжения. Например, лампы накаливания, или электрические нагреватели, не реагируют на большинство типичных искажений сетевого напряжения. В то же время некоторые потребители довольно “капризны” и требуют высокого качества электрической энергии. Среди них, например, станки с электронным (“числовым”) программным управлением, роботизированные комплексы, различные микропроцессорные контроллеры, оргтехника, персональные компьютеры и др. Причем число таких потребителей в общем составе электрооборудования непрерывно растет. Чем выше технологическая культура на предприятии, тем больше доля таких чувствительных к качеству электрической сети объектов. Для подобных потребителей даже незначительные искажения сети могут приводить к серьезным последствиям.

Для определения и устранения причин сбоев и нештатной работы такого рода оборудования, для оценки его восприимчивости к конкретным искажениям необходимо владеть методами определения отдельных параметров электрических сигналов и цепей, необходимо иметь (и уметь применять) современную высокопроизводительную микропроцессорную и компьютерную регистрирующую и анализирующую измерительную технику.

В процессе передачи, распределения, преобразования и потребления электрической энергии в электрических сетях и цепях, основные параметры переменного сигнала — носителя энергии — могут (что вполне естественно) меняться. Например, форма кривой на-

пряжения, вырабатываемого электрическими станциями, как правило, достаточно близка к синусоидальной (практически это чистый гармонический сигнал) и частота сигнала не сильно отличается от 50 Гц. Но специфический потребитель (например, мощный электропривод технологического объекта с тиристорным управлением) может сильно изменить форму напряжения.

Наиболее вероятными виновниками ухудшения качества электроэнергии могут выступать как энергоснабжающие организации, так и потребители с их спецификой нагрузки. Например, в значительном отклонении частоты сети от номинала виноват поставщик энергии, а в сильной несинусоидальности — скорее всего потребитель со своей нелинейной нагрузкой.

Качество электроэнергии в нашей стране нормируется ГОСТ 13109-97 “Нормы качества электрической энергии в системах электро-снабжения общего назначения”. К *основным показателям качества электроэнергии (ПКЭ)* относятся следующие:

- отклонение напряжения;
- колебания напряжения;
- несинусоидальность напряжения;
- несимметрия напряжения;
- отклонение частоты;
- провал напряжения;
- импульс напряжения и временное перенапряжение.

Указанный стандарт устанавливает требования к основным ПКЭ. Если режимы работы электрической сети нормальны, то значения ПКЭ не выходят за пределы нормальных значений.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Типичные ошибки при проведении измерений

3.1. ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ОШИБОК

До 30 % основных фондов развитых предприятий приходится на оснащение стационарным измерительным оборудованием, обслуживание и метрологическое обеспечение парка КИП и автоматики. Важными поэтому являются вопросы правильной организации измерений, верной интерпретации и грамотной обработки результатов. Пренебрежение метрологическими вопросами, легкомысленность подходов, низкая квалификация персонала, невнимательность могут привести к серьезным проблемам и значительным материальным потерям. Особенно актуальна задача обеспечения определенной (заданной) достоверности результатов при измерении и регистрации количества и качества энергоресурсов (цены на которые значительны и постоянно растут).

Например, ошибка даже в 2 – 5 % в определении мощности потребления электроэнергии большого (энергоемкого) объекта может привести к потерям в десятки тысяч рублей в месяц.

Цель данной главы — помочь специалистам-измерителям избежать наиболее распространенных ошибок при выполнении измерений как стационарными (щитовыми), так и автономными (переносными) приборами. Если не рассматривать случаи использования неисправных СИ, то можно говорить о двух основных причинах появления значительных ошибок. *Первую* причину можно условно назвать *субъективной*, поскольку она определяется недостаточно высокой квалификацией специалистов-измерителей. *Вторую* причину условно назовем *объективной*, так как она определяется объективной невозможностью правильного выбора и/или нормального использования необходимых СИ.

Ошибки, связанные с *первой* причиной, могут быть вызваны плохим знанием используемого арсенала СИ (их возможностей, областей и специфики применения, разнообразных ограничений использования), некорректной постановкой задачи, неудачным выбором инструментов и неграмотным их использованием, ошибками в организации и проведении экспериментов, искаженным пониманием и/или реализацией методик выполнения измерений, неверным толкованием результатов измерений и регистрации, неучетом и/или неправильной оценкой некоторых составляющих общей погрешности результата измерений (например, дополнительной, методической, погрешности взаимодействия и др.) и т.п.

Вторая причина возможных ошибок — ограниченность в выборе для измерений “правильных” СИ (т.е. инструментов с требуемыми метрологическими и эксплуатационными характеристиками), объективная невозможность правильно организовать и выполнить эксперименты. Эти ситуации не зависят от квалификации специалистов. Например, при работе с цифровым мультиметром в неотопляемом помещении электрической подстанции в зимнее время, при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, помимо основной инструментальной погрешности, возможна значительная дополнительная погрешность (которая вполне может даже превышать основную). Эту составляющую общей погрешности обязательно необходимо оценивать. *И, конечно же, в этом случае следует убедиться в соответствии условий эксплуатации рабочим условиям, иначе прибор может выйти из строя.*

3.2. ДИАПАЗОН ИЗМЕРЕНИЙ, РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ

В настоящее время мощности многих промышленных предприятий по сравнению с тем, что было 15 — 20 лет назад, как правило, уменьшились, причем значительно. *Если реальная мощность электропотребления объекта гораздо меньше номинальной (мощности по проекту), то относительные погрешности результатов измерения, регистрации или мониторинга могут быть значительными (порой вполне могут превосходить 10 %).*

Большинство стационарных (щитовых) электроизмерительных приборов имеют класс точности, заданный пределом основной приведенной погрешности γ . И хотя предельные значения основных приведенной и абсолютной погрешностей у таких приборов (исправных) постоянны (не зависят от результата измерения), значение возможной относительной погрешности δ быстро растет с уменьшением показаний. Рассмотрим пример (рис. 3.1).

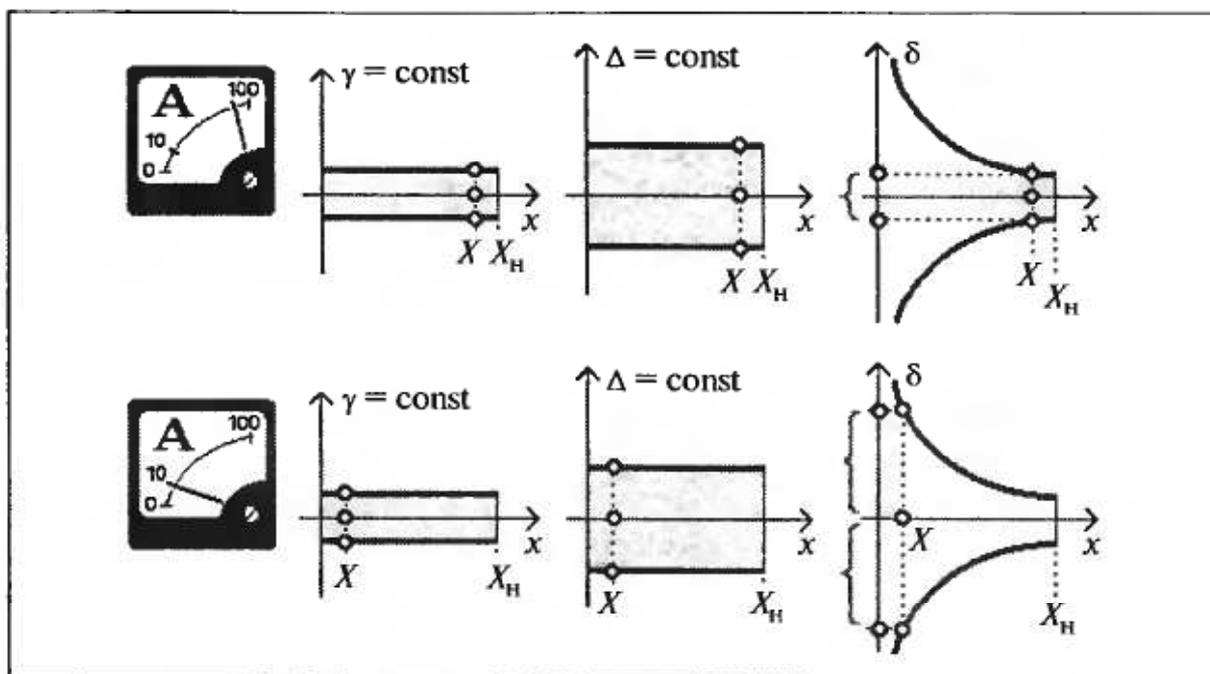


Рис. 3.1. Зависимость относительной погрешности от результата измерения

Исправный электромагнитный щитовой амперметр с известным диапазоном измерения (нормирующим значением X_H) $X_H = 100$ А имеет класс точности 1,5 (т.е. предел его основной приведенной погрешности $\gamma = \pm 1,5\%$). Предположим, показания прибора практически постоянны и равны $X \approx 10$ А, условия проведения эксперимента нормальные (т.е. все влияющие величины находятся в диапазонах своих нормальных значений). При этом предельные значения абсолютной Δ и относительной δ погрешностей равны, соответственно:

$$\Delta = \gamma X_H / 100 = \pm 1,5 \cdot 100 / 100 = \pm 1,5 \text{ А};$$

$$\delta = \Delta 100 / X = \pm 1,5 \cdot 100 / 10 = \pm 15\% (!).$$

Как видим, относительная погрешность в данном случае довольно значительна. И если значения тока, допустим, всегда лежат в диапазоне 5 – 10 А, то это может быть чревато неприятными последствиями. *Материальный ущерб от измерений с такими относительными погрешностями может существенно превосходить необходимые затраты на замену установленного амперметра на прибор с более подходящим диапазоном измерений, например, с $X_H = 20$ А.*

3.3. РАЗЛИЧИЯ В СПОСОБАХ ЗАДАНИЯ КЛАССОВ ТОЧНОСТИ

Определить сразу, какой из нескольких измерительных приборов, классы точности которых заданы по-разному, даст более точ-

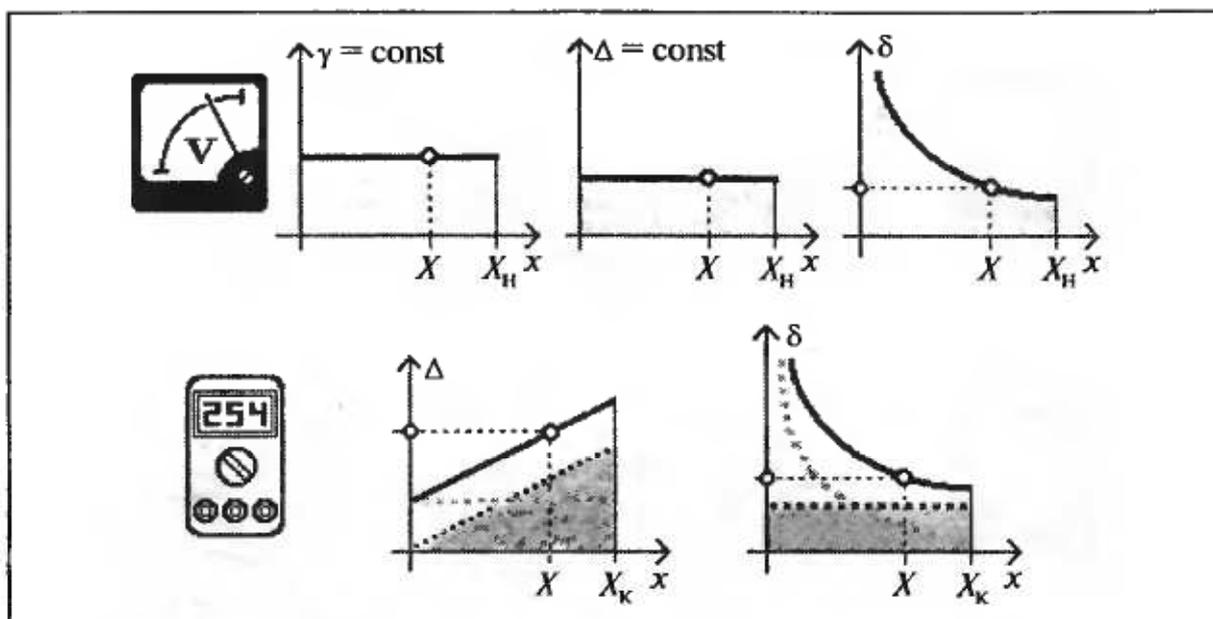


Рис. 3.2. Сравнение погрешностей разных приборов

ный результат не просто. Необходимо привести показатели их точности к одному критерию, например к абсолютной или относительной погрешности и затем уже сравнивать для конкретных применений (для ожидаемых результатов измерений и условий эксплуатации).

Рассмотрим пример. Два вольтметра, аналоговый щитовой электромагнитный и цифровой мультиметр (зарубежный) в режиме вольтметра, одновременно подключены к одному источнику синусоидального напряжения частоты 50 Гц (рис. 3.2). Первый вольтметр имеет класс точности 1,0; нормирующее значение $X_H = 300$ В. Второй прибор имеет класс точности $a/b = 0,5/0,5$. Диапазон измерений второго прибора (мультиметра) $X_K = 1000$ В. Показания первого вольтметра $X_1 = 250$ В; показания второго $X_2 = R = 254$ В. Условия проведения измерений нормальные.

Сравнивать числа 1,0 и 0,5/0,5 невозможно (да и непонятно как). Необходимо для начала понимать и правильно представлять, как заданы классы точности в каждом конкретном случае и уметь приводить оценки точности к единой форме, например к абсолютной погрешности для того и другого прибора.

В данном примере это должно быть выполнено таким образом. У первого вольтметра класс точности задан предельным значением основной приведенной погрешности $\gamma_H = \pm 1,0 \%$. Класс точности второго прибора задан предельным значением основной абсолютной погрешности $\Delta_H = \pm a/b = \pm (0,5 \% FS + 0,5 \% R)$, где FS (Full Scale), т.е. конечное значение диапазона измерений) X_K ; R (Reading)

— результат измерения X_2 . Для упрощения графиков на рис. 3.2 показаны не симметричные коридоры погрешностей, а лишь их модули.

Приведем показатели точности обоих приборов к одному виду — к абсолютной погрешности. Для первого (щитового вольтметра) предельное значение основной абсолютной погрешности $\Delta_{п1} = \pm \gamma_{п1} X_H / 100 \% = \pm 3,0 \text{ В}$. Для второго прибора предельное значение основной абсолютной погрешности $\Delta_{п2} = \pm (0,5 \% \text{ от } 254 \text{ В} + 0,5 \% \text{ от } 1000 \text{ В}) = \pm 6,27 \text{ В} \approx \pm 6,3 \text{ В}$. Таким образом, в данном примере меньшую возможную предельную абсолютную погрешность дает первый вольтметр. Кстати, правильная запись результата измерения этим прибором в случае детерминированного подхода (т.е. при доверительной вероятности $P_{\text{дов}} = 1$) выглядела бы так:

$$X = 250 \text{ В}; \quad \Delta_{п} = \pm 3,0 \text{ В}; \quad P_{\text{дов}} = 1.$$

3.4. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СИГНАЛА НА ПОКАЗАНИЯ ПРИБОРОВ

При работе с периодическими сигналами важно знать особенности устройства и градуировки того или иного типа измерительного прибора. Как правило, приборы градуируются в средних квадратических (действующих) значениях для частного (хотя и довольно распространенного) случая синусоидальной (или — практически синусоидальной) формы сигнала. Такая градуировка объясняется тем, что именно действующее значение является самым важным для большинства измерительных экспериментов в электротехнике и электроэнергетике. Приборы различных систем, включенные параллельно к одному источнику *синусоидального* напряжения, давали бы похожие показания, достаточно близкие к реальному действующему значению (с учетом, конечно, их инструментальных погрешностей). Однако, в выборе конкретных приборов для реальных экспериментов с заметно *несинусоидальными* сигналами следует быть осторожным, поскольку возможны значительные ошибки, так как далеко не все типы приборов реагируют именно на действующее значение.

Рассмотрим некоторые вопросы специфики реакции и градуировки приборов на примере различных вольтметров переменного напряжения.

3.4.1. Периодический сигнал без постоянной составляющей

Предположим, к источнику заметно несинусоидального напряжения одновременно (параллельно) подключены два прибора

(рис. 3.3, б). Источник выдает сигнал прямоугольной формы $u(t)$ амплитудой ± 100 В, частотой 50 Гц и скважностью 2 (рис. 3.3, а). Первый прибор $V1$ — простой и дешевый аналоговый тестер с магнитоэлектрическим измерительным механизмом и выпрямителем. Вторым $V2$ — прецизионный и сравнительно дорогостоящий цифровой мультиметр истинного среднего квадратического (действующего) значения (True Root Mean Square — TRMS). Оба прибора включены в режиме измерения переменного напряжения. Условия проведения измерений — нормальные. Попытаемся найти показания приборов, пренебрегая всеми классическими составляющими погрешностей результатов (основными и дополнительными инструментальными, методическими, субъективными погрешностями, погрешностями взаимодействия).

Первый прибор $V1$ (аналоговый тестер) реагирует на среднее выпрямленное значение $U_{с.в}$ напряжения (Average), но отградуирован, естественно, в средних квадратических (действующих) значениях $U_{с.к}$ для случая синусоидального сигнала, т.е. его показания U_1 связаны с его реакцией коэффициентом формы синусоиды ($K_{ф\sin} = 1,11$):

$$U_1 = U_{с.в} K_{ф\sin}$$

Таким образом, в данном эксперименте вольтметр $V1$, отреагировав на $U_{с.в} = 100$ В, покажет $U_1 = 100 \cdot 1,11 = 111$ В, что, конечно не будет соответствовать реальному действующему значению измеряемого напряжения.

Второй вольтметр $V2$ (цифровой мультиметр) реагирует на истинное среднее квадратическое значение напряжения (TRMS) и отградуирован, естественно, тоже в средних квадратических значениях. Поэтому он покажет U_2 — “правильное” действующее значение входного сигнала, которое в данном случае равно 100 В. Отметим, что разница между показаниями двух исправных приборов, подключенных к одному источнику напряжения, довольно велика и состав-

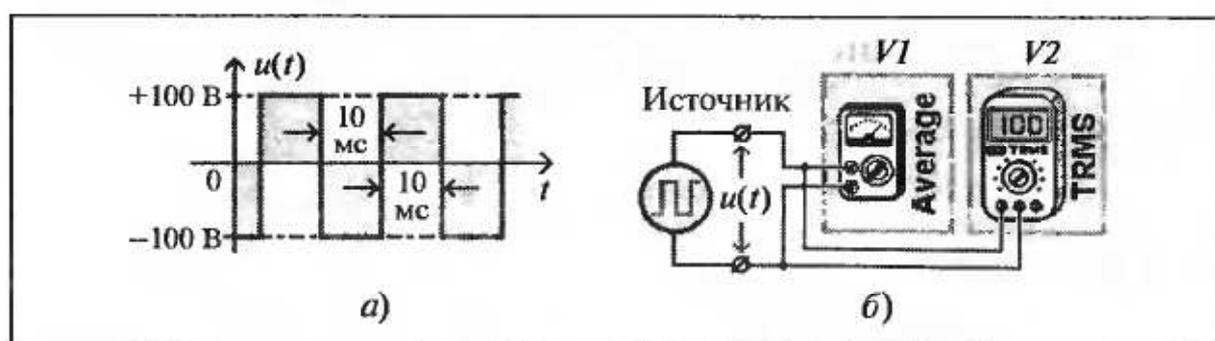


Рис. 3.3. Реакция и показания приборов при несинусоидальном сигнале

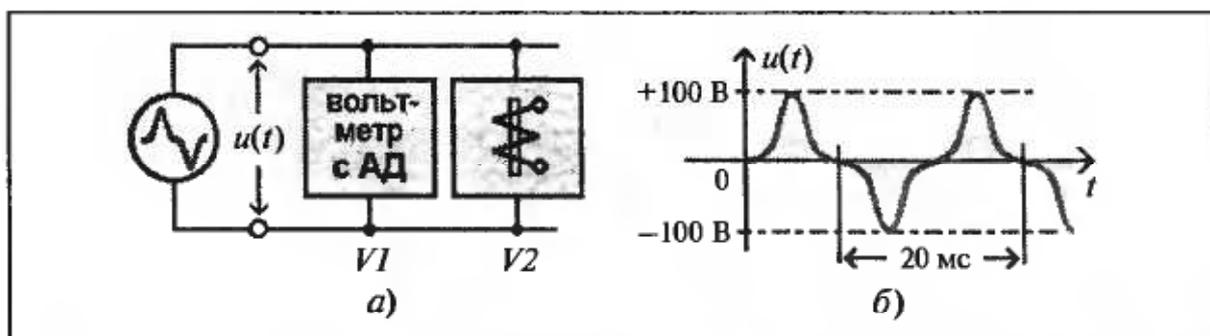


Рис. 3.4. Реакция и показания приборов

ляет более 10 %. Причина — резкая несинусоидальность входного напряжения $u(t)$.

Рассмотрим еще один пример. Два вольтметра: $V1$ — электронный вольтметр с амплитудным детектором (АД) и $V2$ — электромагнитический вольтметр электромагнитной системы (рис. 3.4, а) параллельно подключены к источнику несинусоидального напряжения $u(t)$. Амплитуда измеряемого напряжения $U_M = \pm 100$ В, частота — 50 Гц, коэффициент амплитуды $k_a = 2$ (рис. 3.4, б).

Пренебрегая всеми погрешностями, найдем показания обоих приборов. Первый вольтметр $V1$ реагирует на амплитудное значение U_M входного напряжения, а отградуирован в действующих значениях для случая синусоидального сигнала, т.е. его показания U_1 связаны с его реакцией коэффициентом амплитуды синусоиды ($k_{a \sin} = 1,41$):

$$U_1 = U_M / k_{a \sin}$$

В этом эксперименте вольтметр $V1$, отреагировав на амплитуду $U_M = 100$ В, покажет $U_1 = 100 / 1,41 \approx 71$ В, что явно не равно реальному действующему значению измеряемого напряжения. Реальное действующее (среднее квадратическое) $U_{с.к}$ значение данного сигнал:

$$U_{с.к} = U_M / k_a = 100 / 2 = 50 \text{ В.}$$

Второй вольтметр $V2$ (электромагнитной системы) реагирует именно на действующее значение измеряемого напряжения и отградуирован, конечно, тоже в средних квадратических значениях. Поэтому он покажет “правильное” действующее значение входного сигнала, которое у данного сигнала $U_2 = U_{с.к} = 50$ В. И в этом случае столь большая разница (почти в 1,5 раза !) в показаниях двух приборов, на входе которых один и тот же сигнал — следствие значительной несинусоидальности исследуемого сигнала и различий в устройстве и принципах действия вольтметров.

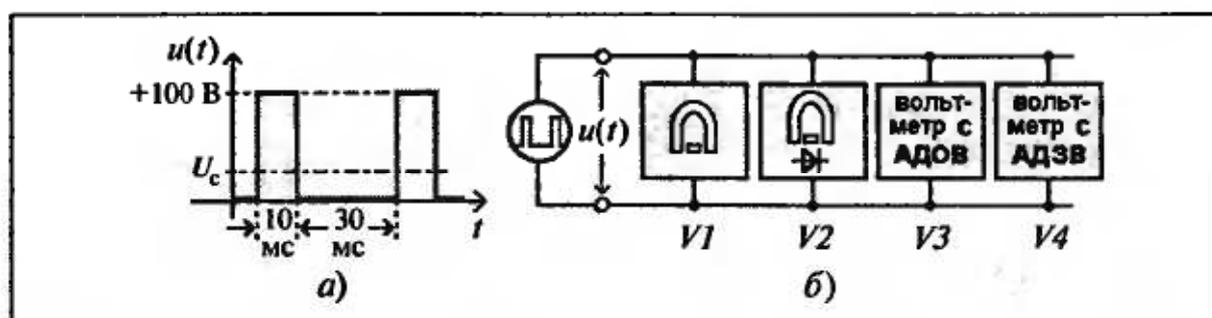


Рис. 3.5. Реакция и показания различных приборов

3.4.2. Сигнал — сумма переменной и постоянной составляющих

Разберем несколько более сложный случай сигнала — однополярного периодического сигнала прямоугольной формы с амплитудой $U_M = +100$ В, длительностью импульса 10 мс, длительностью паузы 30 мс (рис. 3.5, а). Такой сигнал содержит некоторую постоянную составляющую.

Допустим, к этому источнику напряжения подключены одновременно четыре вольтметра различных систем (рис. 3.5, б): $V1$ — магнитоэлектрический; $V2$ — выпрямительный; $V3$ — электронный вольтметр с амплитудным детектором с открытым входом (АДОВ); $V4$ — электронный вольтметр с амплитудным детектором с закрытым входом (АДЗВ).

Предположим, требуется найти (пренебрегая всеми погрешностями) следующее:

- показания всех вольтметров;
- среднее значение входного сигнала U_c ;
- среднее выпрямленное значение сигнала $U_{c.в}$;
- среднее квадратическое (действующее) значение $U_{c.к}$;
- коэффициент амплитуды k_a сигнала;
- коэффициент формы k_ϕ сигнала.

Вольтметр $V1$ (магнитоэлектрический) реагирует на среднее значение U_c и, поскольку не предназначен для работы с переменными сигналами такой частоты, то и покажет среднее значение. Среднее значение U_c в общем случае есть интеграл функции сигнала на периоде. Отличие от нуля этого значения и означает наличие постоянной составляющей. Для указанного сигнала с такой формой значение U_c определяется отношением площади импульса ($100 \text{ В} \cdot 10 \text{ мс}$) к периоду (40 мс):

$$U_c = (100 \cdot 10)/40 = 25 \text{ В.}$$

Среднее выпрямленное значение $U_{с.в}$ в данном случае совпадает со средним значением U_c , так как сигнал однополярный:

$$U_{с.в} = U_c = 25 \text{ В.}$$

Среднее квадратическое (действующее) значение $U_{с.к}$ можно вычислить соответствии с известным общим выражением (см. выше):

$$U_{с.к} = 50 \text{ В.}$$

Поскольку амплитудное значение входного сигнала известно и равно $U_M = 100 \text{ В}$, то можно найти значения коэффициентов амплитуды k_a и формы k_f данного сигнала:

$$k_a = U_M / U_{с.к} = 100 / 50 = 2; \quad k_f = U_{с.к} / U_{с.в} = 50 / 25 = 2.$$

Теперь, вспомнив, на что реагируют и в каких значениях отградуированы подключенные приборы ($V1, V2, V3, V4$), можно найти и записать их показания, соответственно: $U_1 = 25 \text{ В}$; $U_2 = 25 \cdot 1,11 \approx 27,8 \text{ В}$; $U_3 = 100 / 1,41 \approx 71 \text{ В}$; $U_4 = (100 - 25) / 1,41 \approx 53,2 \text{ В}$.

Отметим, что в реальных экспериментах (где форма сигнала часто не известна) подобная разница в показаниях исправных приборов, свидетельствовала бы о значительной несинусоидальности измеряемого сигнала.

Рассмотрим теперь обратную задачу. Допустим, нам известны показания четырех вольтметров ($V1; V2; V3; V4$) различных принципов действия, подключенных параллельно к одному источнику периодического несинусоидального напряжения. Первый вольтметр $V1$ — магнитоэлектрический — показал $U_1 = 20 \text{ В}$; второй $V2$ — электронный с АДОВ — показал $U_2 = 21,3 \text{ В}$; третий $V3$ — электронный с АДЗВ — $U_3 = 7,1 \text{ В}$; четвертый $V4$ — электронный с термоэлектрическим детектором — $U_4 = 22,4 \text{ В}$. Судя по тому, что показания приборов заметно различаются, измеряемый сигнал несинусоидален, а может быть и несимметричен по отношению к оси времени, т.е. имеет ненулевую постоянную составляющую.

Пренебрегая всеми погрешностями, попробуем найти амплитудное U_M , среднее U_c и действующее $U_{с.к}$ значения входного сигнала, а также амплитуду только переменной его составляющей $U_{M\sim}$. Первый прибор $V1$ (магнитоэлектрический вольтметр) реагирует на среднее значение напряжения и показывает его же, т.е. среднее значение $U_c = 20 \text{ В}$. Это означает наличие во входном сигнале постоянной составляющей $U_0 = U_c = 20 \text{ В}$. Общее амплитудное значение U_M

можно определить по показаниям U_2 электронного вольтметра $V2$ с АДОВ:

$$U_M = U_2 k_a \sin = 21,3 \cdot 1,41 \approx 30 \text{ В.}$$

Истинное действующее значение $U_{с.к}$ входного сигнала даст вольтметр с термоэлектрическим детектором:

$$U_{с.к} = U_4 = 22,4 \text{ В.}$$

Показания U_3 вольтметра $V3$ с АДЗВ позволяют найти амплитуду $U_{M\sim}$ только переменной составляющей (поскольку такой прибор игнорирует постоянную составляющую входного сигнала):

$$U_M = U_3 k_a \sin = 7,1 \cdot 1,41 \approx 10 \text{ В.}$$

Если сигнал содержит и постоянную, и переменную составляющие, то суммарное (общее) действующее значение представляет собой их геометрическую сумму (см. выше). Таким образом, найдя действующие значения отдельных составляющих, можно найти общее действующее значение.

3.4.3. Критерии выбора приборов для экспериментов

Как мы уже знаем, периодические сигналы напряжения и тока могут иметь сложную форму, содержать как переменную, так и постоянную составляющие. Для выполнения измерительных экспериментов с такими сигналами следует четко понимать постановку задачи, понимать специфику устройства разных приборов, грамотно выбирать конкретную аппаратуру.

Существуют разнообразные задачи технических измерений и обычно есть возможность выбора подходящих для их решения инструментов среди множества имеющихся. В сегодняшней практике измерений используются разнообразные электромеханические, электронные и цифровые измерительные приборы. Как было показано выше, использовать для нахождения действующих значений измерительные приборы, реагирующие на средние выпрямленные и амплитудные значения сигналов, следует внимательно и осторожно, не забывая о возможной большой погрешности при работе с заметно несинусоидальными сигналами.

В тех случаях, когда необходимо получить “правильное” среднее квадратическое значение периодического сигнала, следует использовать приборы, реагирующие именно на истинное действующее

значение (TRMS). При этом следует различать задачи оценки суммарного действующего значения (т.е. суммы постоянной и переменной составляющих), или поиска действующего значения отдельно переменной и/или постоянной составляющих. Приборы действующего значения, в свою очередь, по реакции на сложные периодические сигналы могут быть поделены на две группы. В первой группе — приборы, позволяющие оценивать суммарное действующее значение, во второй — приборы, предназначенные для измерения действующего значения отдельно только переменной составляющей.

В некоторых экспериментах может потребоваться оценка амплитудного значения сложного сигнала. При этом следует различать, две самостоятельные постановки задачи: оценка общего амплитудного значения сложного сигнала или нахождение амплитуды только переменной его составляющей. Такие эксперименты выполняются с помощью электронных вольтметров с амплитудными детекторами, которые, в свою очередь, делятся на два подкласса: амплитудные детекторы с открытым и с закрытым входами. Приборы с детекторами первого типа реагируют на общее амплитудное (максимальное, самое большое) значение входных сигналов. Вольтметры с детекторами второго типа реагируют на амплитуду только переменной составляющей, т.е. “не пропускают” постоянную составляющую сигнала.

Естественно, различные приборы будут по-разному реагировать на сигналы, содержащие постоянную составляющую, сигналы сложных форм. Поэтому при планировании экспериментов следует тщательно выбирать приборы и аккуратно выполнять обработку полученных результатов.

Список литературы

1. Методы электрических измерений: Учебн. пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов / Под ред. Е. М. Душина. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Методы электрических измерений: Учебн. пособие для вузов / Под ред. Э. И. Цветкова. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Панфилов В. А. Электрические измерения: Учебник для средн. проф. образования. М.: Издательский центр "Академия", 2004.
5. Основополагающие стандарты в области метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1986.
6. ГОСТ 8.401-80. Классы точности средств измерений. Общие требования.
7. РМГ 29-99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. "Метрология. Основные термины и определения".

Содержание

Предисловие	3
ГЛАВА ПЕРВАЯ. Основные понятия и определения	5
1.1. Измерение	6
1.1.1. Физическая величина	6
1.1.2. Виды средств измерений	6
1.1.3. Виды и методы измерений	8
1.2. Единство измерений	10
1.2.1. Единицы физических величин	10
1.2.2. Стандартизация	14
1.2.3. Эталоны	16
1.3. Точность измерений	17
1.3.1. Погрешность результата измерений	17
1.3.2. Погрешности средств измерений	20
1.3.3. Классы точности средств измерений	21
1.3.4. Основная и дополнительная погрешности	24
1.3.5. Методическая погрешность	27
1.3.6. Погрешность взаимодействия	29
1.3.7. Динамическая погрешность	31
1.3.8. Субъективная погрешность	33
1.4. Экспериментальные характеристики	35
1.4.1. Диапазоны температур	36
1.4.2. Защищенность от пыли и влаги	37
1.4.3. Надежность оборудования	39
1.5. Обработка результатов измерений	41
1.5.1. Обработка прямых измерений	42
1.5.2. Многократные прямые измерения	43
1.5.3. Обработка косвенных измерений	45
1.5.4. Пример расчета погрешности результата косвенного измерения	48
ГЛАВА ВТОРАЯ. Основные характеристики электрических сигналов и цепей	50
2.1. Параметрическое представление периодических сигналов	51
2.1.1. Напряжения и токи	52
2.1.2. Коэффициенты амплитуды и формы	53
2.1.3. Коэффициент мощности и $\cos \varphi$	54
2.1.4. Мощность и энергия	56
2.2. Функциональное представление периодических сигналов	57
2.2.1. Напряжения и токи	57
2.2.2. Мощность и энергия	59
2.2.3. Коэффициент мощности и $\cos \varphi$	62
2.3. Трехфазные электрические цепи	63
2.3.1. Напряжения и токи в трехфазной цепи	63
2.3.2. Мощность и энергия в трехфазной цепи	64
2.4. Комплексные сопротивления	65
2.4.1. Фазовый сдвиг	65
2.4.2. Добротность и тангенс угла потерь	66
2.5. Несинусоидальность формы сигнала	67
2.5.1. Параметрическое представление	67
2.5.2. Функциональное представление несинусоидальности	69
2.6. Качество электроэнергии	73
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Типичные ошибки при проведении измерений	75
3.1. Причины появления ошибок	75
3.2. Диапазон измерений, результат измерения и относительная погрешность	76
3.3. Различия в способах задания классов точности	77
3.4. Влияние формы сигнала на показания приборов	79
3.4.1. Периодический сигнал без постоянной составляющей	79
3.4.2. Сигнал — сумма переменной и постоянной составляющих	82
3.4.3. Критерии выбора приборов для экспериментов	84
Список литературы	86

300 z

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу "Энергетик"

ПАНФИЛОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

Основы метрологии и электроизмерительной техники

Б

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23

Телефоны: (095) 675-19-06, тел. 675-00-23 доб. 22-47; факс: 234-74-21

Редакторы: Л. Л. Жданова, Н. В. Ольшанская

Худож.-техн. редактор Т. Ю. Андреева

Сдано в набор 07.12.2005 г. Подписано в печать 20.01.2006 г.

Формат 60×84¹/₁₆. Печать офсетная.

Печ. л. 5,5. Заказ БЭТ/01(85)-2006

Макет выполнен издательством "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Отпечатано типографией издательства "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Журнал “Энергетика за рубежом”

— приложение к журналу “Энергетик”

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу “Энергетик” — **“Энергетика за рубежом”**. Это приложение выходит **один раз в два месяца**.

Журнал “Энергетика за рубежом” знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики, такими, как:

- развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;
- особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;
- опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;
- модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;
- распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **“ПРЕССА РОССИИ”**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Индексы журнала “Энергетика за рубежом”

— приложения к журналу “Энергетик”

87261 — для предприятий и организаций;

87260 — для индивидуальных подписчиков.

Об авторе



Владимир Александрович Панфилов — выпускник Московского энергетического института МЭИ, канд. техн. наук, доцент. В течение многих лет читал различные лекционные курсы.

Является автором и соавтором множества научно-технических публикаций и ряда учебно-методических изданий. “Отличник приборостроения СССР”, лауреат разнообразных творческих и технических конкурсов. За достижения в разработке различных цифровых средств измерений награжден шестью медалями ВДНХ СССР (ВВЦ) — золотыми, серебряными, бронзовыми. Автор нескольких изобретений. В настоящее время занимается практическими задачами экспресс-измерений, инструментального энергоаудита, выполняемого в рамках различных энергетических обследований промышленных предприятий, энергетики, объектов жилищно-коммунального хозяйства и социальной сферы.

От грамотно проведенных измерений и верной интерпретации результатов зависит не только эффективность использования электрооборудования, но и безопасность работы персонала и объекта в целом