



МИР Электроники

Я. Фрейдин

Современные датчики.
Справочник

Перевод с английского

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2021

УДК 681.586
ББК 32.844.1
Ф86

Ф86 Фрейдин Я.

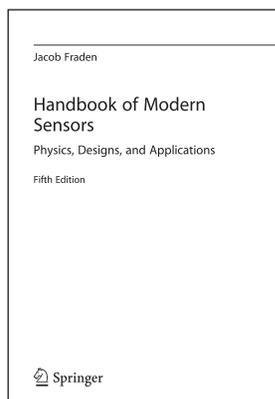
Современные датчики. Справочник

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 800 с. ISBN 978-5-94836-619-7

Справочник по современным датчикам можно назвать настольной книгой исследователя в любой области естествознания, поскольку в нем изложены физические принципы, методы разработки и варианты практического использования широкого спектра датчиков в самых разнообразных областях применений. Книга выдержала пять изданий на английском языке, и это не случайно, ведь любая современная система измерений не обходится без применения датчиков, которые являются «переводчиками» окружающей аналоговой природы на язык цифровой техники.

Со времени публикации первого русского издания произошло значительное развитие технологии создания широкого спектра датчиков и детекторов, которые совершили значительный рывок в развитии. Чувствительность датчиков стала выше, габариты меньше, селективность – лучше, а цены – ниже. Быстро развивается новая, ставшая основной, область применения датчиков в устройствах мобильной связи, поэтому в настоящем издании более подробно рассмотрена данное направление. Важным является новая информация по созданию химических и биохимических датчиков. В книге уделено внимание математическому моделированию передаточных характеристик датчиков, используемых при создании измерительных систем и комплексов.

Книга является превосходным справочным пособием для студентов, исследователей, проектировщиков датчиков и специалистов, разрабатывающих измерительные системы.



УДК 681.586
ББК 32.844.1

Впервые опубликовано на английском языке под заголовком:
Handbook of Modern Sensors; Physics, Designs, and Applications
by Jacob Fraden, edition: 5

Copyright © Springer International Publishing Switzerland, 2016

Это издание было переведено и опубликовано по лицензии от Springer Nature Switzerland AG. Springer Nature Switzerland AG не несет никакой ответственности и не несет ответственности за точность перевода.

© Springer International Publishing Switzerland 2004, 2010, 2016

© American Institute of Physics 1993, 1997

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский язык, оригинал-макет,
оформление, 2021

При оформлении первой страницы обложки использовано изображение с сайта свободной шахтерской энциклопедии <http://miningwiki.ru> (CC-BY-SA-3.0).

ISBN 978-5-94836-619-7

ISBN 978-3-319-19302-1 (англ.)

Содержание

Предисловие	14
Глава 1. Сбор данных	16
1.1. Датчики, сигналы и системы	16
1.2. Классификация датчиков	23
1.3. Единицы измерения.....	26
Литература.....	28
Глава 2. Функции преобразования	29
2.1. Математические модели	29
2.1.1. Концепция.....	30
2.1.2. Аппроксимация функций	31
2.1.3. Линейная регрессия	35
2.1.4. Полиномиальная аппроксимация	35
2.1.5. Чувствительность	36
2.1.6. Кусочно-линейная аппроксимация.....	37
2.1.7. Интерполяция с помощью сплайн-функции.....	38
2.1.8. Многомерные функции передачи	38
2.2. Калибровка	39
2.3. Расчет параметров	42
2.4. Расчет внешнего воздействия	44
2.4.1. Использование аналитического уравнения	44
2.4.2. Использование кусочно-линейной аппроксимации	45
2.4.3. Итерационные вычисления внешнего воздействия (метод Ньютона)	48
Литература.....	50
Глава 3. Характеристики датчиков	51
3.1. Датчики для устройств мобильной связи	51
3.1.1. Требования к УМС-датчикам	52
3.1.2. Интеграция	54
3.2. Диапазон измеряемых значений (максимальный входной сигнал).....	55
3.3. Диапазон выходных значений	55
3.4. Точность.....	56
3.5. Ошибка калибровки.....	59
3.6. Гистерезис	60
3.7. Нелинейность.....	60
3.8. Насыщение	62
3.9. Воспроизводимость.....	62
3.10. Мертвая зона.....	63
3.11. Разрешающая способность	63
3.12. Специальные характеристики	64
3.13. Выходное сопротивление	64
3.14. Формат выходного сигнала	65
3.15. Сигнал возбуждения.....	66

3.16. Динамические характеристики	66
3.17. Динамические модели элементов датчиков	70
3.17.1. Механические элементы	71
3.17.2. Тепловые элементы	72
3.17.3. Электрические элементы	73
3.17.4. Аналогии	74
3.18. Факторы окружающей среды	75
3.19. Надежность	78
3.19.1. СВМО	78
3.19.2. Экстремальное испытание	78
3.19.3. Ускоренное тестирование времени эксплуатации	79
3.19.3.1. Ускоренное тестирование датчиков методом экстремальных условий среды эксплуатации	80
3.19.3.2. Ускоренные испытания на долговечность и сохраняемость (УИДС)	81
3.19.3.3. Ускоренное тестирование на отказ (УТО)	81
3.20. Характеристики датчиков, диктуемые условиями их применения	82
3.21. Статистическая оценка	82
Литература	85
Глава 4. Физические основы чувствительности	86
4.1. Электрические заряды, поля и потенциалы	87
4.2. Емкость	94
4.2.1. Конденсатор	96
4.2.2. Диэлектрическая проницаемость	97
4.3. Магнетизм	101
4.3.1. Закон Фарадея	104
4.3.2. Постоянные магниты	106
4.3.3. Катушка и соленоид	107
4.4. Индукция	108
4.4.1. Закон Ленца	113
4.4.2. Вихревые токи	114
4.5. Сопротивление	114
4.5.1. Удельное сопротивление	116
4.5.2. Температурная чувствительность резистора	118
4.5.3. Тензочувствительность резисторов	121
4.5.4. Влажочувствительность резистора	123
4.6. Пьезоэлектрический эффект	124
4.6.1. Керамические пьезоэлектрические материалы	127
4.6.2. Полимерные пьезоэлектрические пленки	131
4.7. Пироэлектрический эффект	133
4.8. Эффект Холла	140
4.9. Термоэлектрические эффекты	143
4.9.1. Эффект Зеебека	143
4.9.2. Эффект Пельтье	148

4.10. Звуковые волны	150
4.11. Температура и тепловые свойства материалов	153
4.11.1. Температурные шкалы.....	154
4.11.2. Тепловое расширение.....	156
4.11.3. Теплоемкость	158
4.12. Теплопередача.....	159
4.12.1. Теплопроводность	160
4.12.2. Тепловая конвекция	163
4.12.3. Тепловое излучение	164
4.12.3.1. Излучательная способность	167
4.12.3.2. Эффект полости.....	172
Литература.....	175
Глава 5. Оптические компоненты датчиков.....	177
5.1. Свет	177
5.1.1. Энергия квантов света.....	177
5.1.2. Поляризация света	179
5.2. Рассеяние света	180
5.3. Геометрическая оптика	181
5.4. Радиометрия	183
5.5. Фотометрия	188
5.6. Свето пропускающие окна.....	191
5.7. Зеркала.....	193
5.7.1. Зеркала с покрытиями.....	194
5.7.2. Призматические зеркала.....	196
5.8. Линзы.....	197
5.8.1. Линзы с изогнутыми поверхностями	197
5.8.2. Линзы Френеля	198
5.8.3. Плоские линзы	201
5.9. Оптические волокна и волноводы.....	202
5.10. Оптическая эффективность	206
5.10.1. Эффект линз	206
5.10.2. Концентраторы.....	208
5.10.3. Покрытия, поглощающие тепловое излучение.....	209
5.10.4. Антибликовые покрытия	210
Литература.....	211
Глава 6. Интерфейсные электронные схемы	212
6.1. Формирователи сигналов.....	214
6.1.1. Входные характеристики интерфейсных схем.....	215
6.1.2. Усилители	220
6.1.3. Операционные усилители	220
6.1.4. Повторители напряжения.....	223
6.1.5. Преобразователи заряда и тока в напряжение	223
6.1.6. Преобразователи свет – напряжение	225
6.1.7. Конвертеры емкость – напряжение	227

6.1.8. Конвертеры емкость – напряжение с замкнутым контуром.....	230
6.2. Подключение датчиков.....	231
6.2.1. Измерители отношений сигналов.....	232
6.2.2. Дифференциальные цепи.....	234
6.2.3. Мост Уитстона.....	235
6.2.4. Уравновешенный мост.....	238
6.2.5. Мостовые усилители.....	239
6.3. Схемы возбуждения.....	241
6.3.1. Генераторы тока.....	243
6.3.2. Генераторы напряжения.....	245
6.3.3. Источники опорного напряжения.....	247
6.3.4. Генераторы.....	247
6.4. Аналого-цифровые преобразователи.....	249
6.4.1. Основные концепции.....	250
6.4.2. Преобразователи напряжения в частоту (ПНЧ).....	252
6.4.3. Конвертеры широтно-импульсной модуляции.....	256
6.4.4. Преобразователи сопротивление – частота.....	257
6.4.5. Преобразователь последовательного приближения.....	258
6.4.6. Улучшение разрешающей способности систем сбора данных.....	260
6.4.7. Интерфейс АЦП.....	262
6.5. Встроенные интерфейсы.....	264
6.5.1. Преобразователь напряжения.....	264
6.5.2. Преобразователь напряжения.....	265
6.6. Передача данных.....	266
6.6.1. Двухпроводная передача.....	267
6.6.2. Четырехпроводной способ подключения датчика.....	268
6.7. Шумы в датчиках и интерфейсных схемах.....	268
6.7.1. Собственные шумы.....	269
6.7.2. Вносимый шум.....	273
6.7.2.1. Аддитивный шум.....	273
6.7.2.2. Мультипликативный шум.....	275
6.7.3. Электрическое экранирование.....	278
6.7.4. Блокировочные конденсаторы.....	281
6.7.5. Экранирование от магнитных полей.....	282
6.7.6. Механический шум.....	284
6.7.7. Слои заземления.....	285
6.7.8. Развязка по цепи заземления и паразитные контуры заземления.....	286
6.7.9. Шум Зеебека.....	288
6.8. Гальванические источники питания для маломощных датчиков.....	289
6.8.1. Первичные элементы.....	291
6.8.1.1. Щелочно-марганцевые батареи.....	291
6.8.1.2. Первичные литиевые батареи.....	291
6.8.2. Вторичные элементы (аккумуляторы).....	292
6.8.3. Суперконденсаторы.....	292

6.9. Аккумуляция энергии.....	293
6.9.1. Аккумуляция световой энергии	293
6.9.2. Аккумуляция дальнего поля	295
6.9.3. Аккумуляция ближнего поля	295
Литература.....	296
Глава 7. Детекторы человека	298
7.1. Ультразвуковые датчики.....	300
7.2. Микроволновые детекторы движения	303
7.3. Микроимпульсные радары	309
7.4. Георадары.....	311
7.5. Линейные оптические датчики (ПЧД).....	313
7.6. Емкостные датчики присутствия.....	316
7.7. Трибоэлектрические датчики движения	320
7.8. Оптоэлектронные детекторы движения.....	322
7.8.1. Структура датчиков.....	323
7.8.2. Составные датчики.....	324
7.8.3. Датчики со сложной формой чувствительного элемента.....	325
7.8.4. Искажения изображений	325
7.8.5. Фасетный фокусирующий элемент	325
7.8.6. Детекторы движения, работающие в видимой и ближней ИК-областях спектра.....	327
7.8.7. Детекторы движения, работающие в среднем и дальнем ИК-диапазонах	329
7.8.8. Детекторы движения на основе пассивных ИК-элементов	330
7.8.9. Анализ эффективности ПИК-детектора.....	333
7.9. Оптические датчики присутствия	338
7.9.1. Фотоэлектрический пучок.....	338
7.9.2. Детекторы на основе отражения света	339
7.10. Датчики, работающие на градиентах давления.....	340
7.11. Двумерные указывающие устройства	343
7.12. Детекторы жестов (3D-визуализация движущихся объектов).....	344
7.12.1. Инерционная и гироскопическая мышь	345
7.12.2. Оптические датчики движения.....	345
7.12.3. Датчики жестов ближнего поля	346
7.13. Тактильные датчики	347
7.13.2. Пьезоэлектрические тактильные датчики.....	350
7.13.3. Пьезорезистивные тактильные датчики.....	354
7.13.4. Тактильные МЭМС-датчики	356
7.13.5. Емкостные датчики прикосновений	357
7.13.6. Оптические датчики прикосновений	361
7.13.7. Оптические датчики отпечатков пальцев.....	362
Литература.....	363
Глава 8. Детекторы присутствия, смещения и уровня	365
8.1. Потенциометрические датчики	366
8.2. Пьезорезистивные датчики.....	370

8.3. Емкостные датчики	372
8.4. Индуктивные и магнитные датчики	376
8.4.1. Линейно-регулируемые дифференциальные трансформаторы (ЛРДТ) и поворотнo-регулируемые дифференциальные трансформаторы (ПРДТ)	377
8.4.2. Поперечные индуктивные датчики	379
8.4.3. Датчики на вихревых токах	380
8.4.4. Автодорожные петли	382
8.4.5. Детекторы металлов	383
8.4.6. Датчики на основе эффекта Холла	384
8.4.7. Магниторезистивные датчики	390
8.4.8. Магнитострикционный детектор	392
8.5. Оптические датчики	394
8.5.1. Оптические мостовые схемы	394
8.5.2. Поляризационный детектор приближения	395
8.5.3. Призматические и отражательные датчики	396
8.5.4. Датчики Фабри – Перо	398
8.5.5. Датчики на основе волоконной решетки Брэгга	400
8.5.6. Решетчатые датчики и фотомодуляторы	402
8.6. Датчики толщины и уровня	404
8.6.1. Датчики на основе абляции	404
8.6.2. Датчики толщины пленок	406
8.6.3. Датчики уровня жидкости при низких температурах	409
Литература	410
Глава 9. Датчики скорости и ускорения	411
9.1. Датчики постоянной скорости	414
9.1.1. Линейная скорость	414
9.1.2. Датчики скорости вращения (тахометры)	416
9.2. Инерционные датчики вращения	417
9.2.1. Роторный гироскоп	418
9.2.2. Вибрационные гироскопы	419
9.2.3. Оптические (лазерные) гироскопы	422
9.3. Инерционные линейные датчики (акселерометры)	424
9.3.1. Передаточная функция и характеристики	425
9.3.2. Датчики наклона	429
9.3.3. Сейсмические датчики	432
9.3.4. Емкостные акселерометры	434
9.3.5. Пьезорезистивные акселерометры	437
9.3.6. Пьезоэлектрические акселерометры	437
9.3.7. Тепловые акселерометры	439
9.3.7.1. Акселерометры с нагреваемой пластиной	439
9.3.7.2. Акселерометры с нагреваемым газом	440
9.3.8. Акселерометры с замкнутым контуром	442
Литература	444

Глава 10. Сила и деформация	445
10.1. Основные положения.....	445
10.2. Тензодатчики	448
10.3. Пленки, чувствительные к давлению	451
10.4. Пьезоэлектрические датчики силы	453
10.5. Пьезоэлектрические кабели.....	457
10.6. Оптические датчики силы.....	460
Литература.....	461
Глава 11. Датчики давления	463
11.1. Общие понятия о давлении.....	463
11.2. Единицы измерения давления	465
11.3. Ртутные датчики давления	466
11.4. Сильфоны, мембраны и тонкие пластины	467
11.5. Пьезорезистивные датчики.....	469
11.6. Емкостные датчики	475
11.7. Датчики переменного магнитного сопротивления.....	477
11.8. Оптоэлектронные датчики давления.....	479
11.9. Датчик косвенного измерения давления.....	480
11.10. Вакуумные датчики	482
11.10.1. Вакуумметры Пирани.....	483
11.10.2. Ионизационные датчики	485
11.10.3. Датчик газового сопротивления.....	486
Литература.....	487
Глава 12. Расходомеры	488
12.1. Основы гидродинамики	488
12.2. Датчики скорости потока по перепаду давления	490
12.3. Тепловые расходомеры.....	493
12.3.1. Термоанемометры.....	494
12.3.2. Трехкомпонентный термоанемометр	498
12.3.3. Двухкомпонентный термоанемометр.....	500
12.3.4. Термоанемометры микропотока.....	504
12.4. Ультразвуковые расходомеры.....	505
12.5. Электромагнитные расходомеры.....	508
12.6. Детектор изменения скорости потока газа.....	510
12.7. Кориолисовы расходомеры.....	511
12.8. Расходомеры на основе вязкости.....	513
12.9. Кантилеверные датчики МЭМС.....	514
12.10. Детекторы пыли и дыма	515
12.10.1. Ионизационный детектор	515
12.10.2. Оптический детектор	517
Литература.....	519
Глава 13. Микрофоны	521
13.1. Характеристики микрофона	522
13.1.1. Выходное сопротивление.....	522

13.1.2. Сбалансированный симметричный выход.....	523
13.1.3. Чувствительность	523
13.1.4. Частотная характеристика	524
13.1.5. Собственный шум	525
13.1.6. Направленность.....	525
13.1.7. Эффект близости	529
13.2. Резистивные микрофоны.....	529
13.3. Электростатические конденсаторные микрофоны.....	530
13.4. Электретные микрофоны.....	532
13.5. Оптические микрофоны	534
13.6. Пьезоэлектрические микрофоны	536
13.6.1. Низкочастотный диапазон.....	537
13.6.2. Ультразвуковой диапазон	538
13.7. Динамические микрофоны	541
Литература.....	542
Глава 14. Датчики влажности и содержания воды	543
14.1. Общие понятия о влажности.....	543
14.2. Концепции датчиков влажности	547
14.3. Емкостные датчики влажности.....	548
14.4. Резистивные датчики влажности	551
14.5. Термисторные датчики влажности	552
14.6. Оптический гигрометр	553
14.6.1. Охлаждаемое зеркало	553
14.6.2. Световые датчики относительной влажности.....	555
14.7. Вибрационный гигрометр.....	556
14.8. Измерение влажности почвы	557
Литература.....	559
Глава 15. Детекторы световых излучений.....	561
15.1. Введение.....	561
15.1.1. Принцип действия квантовых детекторов	562
15.2. Фотодиоды.....	566
15.3. Фототранзисторы	572
15.4. Фоторезисторы	574
15.5. Охлаждаемые детекторы	577
15.6. Датчики изображения для видимого диапазона	579
15.6.1. Датчик CCD (ПЗС).....	581
15.6.2. Датчики изображения CMOS (КМОП).....	582
15.7. УФ-детекторы	583
15.7.1. Материалы и конструкции.....	583
15.7.2. Лавинные УФ-детекторы	584
15.8. Детекторы ИК-излучений.....	585
15.8.1. Общие положения	585
15.8.2. Ячейки Голя.....	588
15.8.3. Термобатареи	589

15.8.4. Пирозлектрические датчики	596
15.8.5. Микроболометры	602
Литература.....	605
Глава 16. Детекторы ионизирующего излучения	607
16.1. Сцинтилляционные детекторы.....	608
16.2. Ионизационные детекторы.....	612
16.2.1. Ионизационные камеры	612
16.2.2. Пропорциональные камеры	613
16.2.3. Счетчики Гейгера – Мюллера	614
16.2.4. Полупроводниковые детекторы радиоактивности	616
16.3. Облачные и пузырьковые камеры	620
Литература.....	622
Глава 17. Датчики температуры	623
17.1. Связь с объектом	623
17.1.1. Статический теплообмен	623
17.1.2. Динамический теплообмен.....	627
17.1.3. Схема датчика	630
17.1.4. Обработка сигнала отклика датчика	632
17.1.4.1. Алгоритм прогнозирования	632
17.2. Температурные эталоны	634
17.3. Резистивные датчики температуры (РДТ)	635
17.4. Керамические термисторы.....	637
17.4.1. Простая модель.....	639
17.4.2. Модель Фрейдина.....	641
17.4.3. Модель Стейнхарта и Харта	644
17.4.4. Явление саморазогрева в термисторах с отрицательным температурным коэффициентом.....	645
17.4.5. Керамические термисторы с положительным температурным коэффициентом.....	649
17.4.6. Изготовление термисторов с отрицательным температурным коэффициентом.....	653
17.5. Кремниевые и германиевые термисторы	655
17.6. Полупроводниковые датчики температуры на основе р-п-перехода.....	659
17.7. Кремниевые датчики температуры с ПТК	664
17.8. Термоэлектрические контактные датчики	666
17.8.1. Законы термоэлектричества	667
17.8.2. Схемы подключения термопар	670
17.8.2.1. Схема с разделенными спаями	670
17.8.2.2. Схема с разделенным переходом	671
17.8.3. Термопарные сборки	672
17.9. Оптические датчики температуры	675
17.9.1. Флуоресцентные датчики.....	675
17.9.2. Интерферометрические датчики	677
17.9.3. Зондирование со сверхвысоким разрешением.....	678

17.9.4. Датчики на основе растворов, изменяющих цвет в зависимости от температуры.....	679
17.9.5. Волоконно-оптические датчики температуры (FBG)	679
17.10. Акустические датчики температуры	680
17.11. Пьезоэлектрические датчики температуры.....	682
Литература.....	682
Глава 18. Химические и биохимические датчики	685
18.1. Общие сведения.....	686
18.1.1. Химические датчики	686
18.1.2. Биохимические датчики.....	687
18.2. История развития химических и биохимических датчиков	687
18.3. Характеристики химических датчиков.....	688
18.3.1. Избирательность (селективность)	689
18.3.1.1. Распознавание по принципу «замок – ключ».....	689
18.3.1.2. Каталитическая избирательность (селективность).....	690
18.3.1.3. Электрохимическая избирательность	690
18.3.2. Чувствительность	691
18.4. Электрические и электрохимические датчики	693
18.4.1. Электродные системы	693
18.4.2. Потенциометрические датчики	696
18.4.3. Кондуктометрические датчики.....	697
18.4.3.1. Амперометрические датчики.....	700
18.4.4. Химические датчики с управлением металл – оксид – полупроводник (МОП).....	702
18.4.5. Эластомерные химические резисторы	704
18.4.6. Химические емкостные датчики	707
18.4.7. Химические полевые транзисторы	709
18.5. Фотоионизационные детекторы.....	711
18.6. Физические преобразователи	712
18.6.1. Устройства на акустических волнах.....	713
18.6.2. Микрокантилеверы	716
18.7. Спектрометры.....	719
18.7.1. Спектрометрия ионной подвижности.....	719
18.7.2. Квадрупольный масс-спектрометр.....	720
18.8. Тепловые датчики	721
18.8.1. Концепция.....	721
18.8.2. Каталитические датчики Пелистера.....	723
18.9. Оптические преобразователи.....	724
18.9.1. Инфракрасное детектирование	724
18.9.2. Оптоволоконные преобразователи.....	725
18.9.3. Логометрическая избирательность (пульсоксиметр).....	726
18.9.4. Датчики изменения цвета	730
18.10. Измерения при помощи нескольких датчиков	731
18.10.1. Общие положения	731

18.10.2. Электронные анализаторы запаха и вкуса (электронные носы и языки)	731
18.11. Проблемы химических датчиков	736
Литература.....	737
Глава 19. Материалы датчиков и технологии изготовления	743
19.1. Материалы	743
19.1.1. Применение кремния для изготовления датчиков	743
19.1.2. Пластмассы.....	747
19.1.3. Металлы и сплавы	752
19.1.4. Керамические материалы	754
19.1.5. Структурные стекла.....	755
19.1.6. Оптические стекла.....	756
19.1.6.1. Видимый и ближний инфракрасный диапазоны.....	756
19.1.6.2. Средний и дальний инфракрасный диапазоны	757
19.2. Наноматериалы	758
19.3. Поверхностные технологии	760
19.3.1. Центробежное литье.....	760
19.3.2. Термовакuumное напыление.....	761
19.3.3. Ионное распыление	762
19.3.4. Химическое осаждение из газовой фазы	763
19.3.5. Гальваника	764
19.4. МЭМС-технологии	766
19.4.1. Фотолитография	766
19.4.2. Микрообработка кремния	767
19.4.2.1. Основные методы.....	768
19.4.2.2. Нанесение тонких пленок.....	768
19.4.2.3. Жидкостное травление.....	768
19.4.2.4. Травление с барьерным слоем.....	770
19.4.2.5. Сухое травление	771
19.4.3. Микрообработка перемычек и консолей (кантилеверов)	772
19.4.4. Метод обратной литографии	773
19.4.5. Соединение подложек.....	774
19.4.6. LIGA.....	774
Литература.....	775
Приложения	776
Предметный указатель	794

Предисловие

Современные компьютеризированные устройства стирают одежду, готовят кофе, проигрывают музыку, охраняют дома и выполняют множество полезных функций. Однако ни одно такое электронное устройство не может работать без получения информации извне. Даже если такая информация исходит от другого электронного устройства, где-то в цепочке, есть по крайней мере один компонент, предназначенный для приема внешних входных сигналов. Этот компонент называется «датчик». Современные сигнальные процессоры — это устройства, которые манипулируют двоичными кодами, на аппаратном уровне представленными электрическими импульсами. Поскольку мы живем в аналоговом мире, который в основном не является цифровым или электрическим (кроме атомного уровня), датчики — это устройства интерфейса между различными физическими величинами и электронными схемами, «понимающими» только язык движущихся электрических зарядов. Другими словами, датчики — это глаза, уши и носы кремниевых чипов. Эта книга о созданных человеком датчиках, которые очень сильно отличаются от органов чувств живых организмов.

Со времени публикации предыдущего издания этой книги технологии детектирования совершили значительный рывок в своем развитии. Чувствительность датчиков стала выше, габариты — меньше, селективность — лучше, а цены — ниже. Новая, ставшая основной областью применения датчиков — устройства мобильной связи — быстро развивается. Несмотря на то что в таких устройствах используются датчики, работающие на тех же фундаментальных принципах, что и прежние датчики, из-за их использования в мобильных устройствах к ним предъявляются особые требования. Среди них — миниатюрные размеры и полная интеграция с компонентами обработки сигналов и средств связи. Таким образом, в новом издании мы более подробно рассмотрим мобильную составляющую технологий детектирования.

Датчик преобразует входные сигналы физической природы в электрические выходные сигналы. Мы подробно рассмотрим принципы таких преобразований и соответствующие законы физики. Один из величайших гениев, когда-либо живших, Леонардо да Винчи, возможно, имел свой особый способ обращения к Богу (согласно книге Акима Волынского, опубликованной на русском языке в 1900 году). Леонардо обращался к Богу с такими словами: «О Господь, спасибо, что следуешь Твоим законам». Воистину утешительно то, что законы природы не меняются, а наше понимание ее законов постоянно совершенствуется. Разделы книги, посвященные этим законам, практически не изменились по сравнению с предыдущим изданием. Разделы же, описывающие практические реализации датчиков, были существенно переработаны, были добавлены последние идеи и разработки и исключены устаревшие и неактуальные в наше время.

В ходе инженерной работы мне часто хотелось найти книгу, в которой объединялась бы практическая информация по широкому списку тем, связанных с наиболее важными физическими законами, конструкциями и применениями различных датчиков. Конечно, я мог просматривать Интернет или библиотечные полки в поисках книг по физике, химии, электронике, рыться в технических и научных журналах, но информация так сильно разбросана по множеству публикаций и веб-сайтов, что почти каждый вопрос, над которым я размышлял, требовал серьезного исследования

и времени. Постепенно я собрал практическую информацию обо всем, что так или иначе связано с различными датчиками и их применением в научных и инженерных измерениях. Я также провел бесконечные часы за лабораторным столом, изобретая и разрабатывая множество устройств, использующих различные датчики. Вскоре я понял, что собранная мною информация будет весьма полезна не только мне. Эта идея побудила меня написать данную книгу, а факт выпуска ее пятого обновленного издания является доказательством того, что я был прав.

Темы, включенные в книгу, отражают собственные предпочтения и интерпретации автора. Некоторым описания конкретного датчика могут показаться слишком подробными, обширными или, возможно, слишком лаконичными. Устанавливая свои критерии выбора различных датчиков для данного нового издания, я старался сохранить как можно более широкий охват тем, отдавая предпочтение множеству различных конструкций, описанных весьма сжато (но, надеюсь, не тривиально), вместо того чтобы рассматривать меньшее количество более подробно. В этой книге делается попытка (возможно, нескромная) охватить очень широкий спектр датчиков и детекторов. Многие из них хорошо известны, но их описание по-прежнему полезно для студентов и тех, кто ищет удобный, но полный справочник.

Ни в коем случае эта книга не является заменой спецификаций. В ней дается обзор множества конструкций и свойств датчиков с высоты птичьего полета, но без углубления в какую-либо одну конкретную тему. В большинстве случаев я пытался найти баланс между детализацией и простотой освещения материала, однако простота и ясность были самыми важными требованиями, которые я поставил перед собой. Моя истинная цель состояла не в том, чтобы накопить информацию и выдать ее в одной книге, а в том, чтобы побудить читателя к творческому мышлению. Как сказал почти два тысячелетия назад Плутарх, *«ум – это не сосуд, который нужно наполнить, но огонь, который нужно разжечь»*.

Несмотря на то что эта книга предназначена для ученых и инженеров, как правило, технические описания и математические трактовки в ней обычно не требуют углубленных знаний, выходящих за рамки школьной программы. Это справочный текст, который может быть использован исследователями и студентами, интересующимися современным приборостроением (прикладными физиками и инженерами), разработчиками датчиков, инженерами по применению современной техники, чья работа заключается в понимании, выборе или проектировании датчиков для практических систем.

Предыдущие издания этой книги довольно широко использовались в качестве настольных справочников и учебников для соответствующих курсов в колледже. Комментарии и предложения разработчиков датчиков, инженеров приложений, профессоров и студентов побудили меня внести некоторые изменения и исправить ошибки. Я глубоко благодарен тем, кто помог мне улучшить новое издание. Я в долгу перед доктором Эфраимом Сухиром и Давидом Пинцовым за помощь в математической обработке передаточных функций и доктором Санджаем В. Пателем за его вклад в главу, посвященную химическим сенсорам.

ГЛАВА I

СБОР ДАННЫХ

Это такое же большое, как жизнь,
но гораздо более натуральное.
Льюис Кэрролл «Алиса в Зазеркалье»

1.1. Датчики, сигналы и системы

Наиболее часто используемое определение датчиков звучит так: «датчик – это устройство, воспринимающее сигналы и внешние воздействия и реагирующее на них». Это очень широкое определение. Фактически оно настолько широкое, что охватывает почти все: от человеческого глаза до спускового крючка в револьвере. Рассмотрим систему контроля за уровнем жидкости, показанную на рис. 1.1 [1]. Оператор управляет уровнем жидкости в резервуаре при помощи клапана. При этом оператор должен учитывать расход жидкости, изменение температуры (от которого зависит вязкость жидкости и, следовательно, скорость ее прохождения через клапан), а также другие параметры, оказывающие влияние на эту систему. Без осуществления контроля резервуар либо перельется, либо, наоборот, станет пустым.

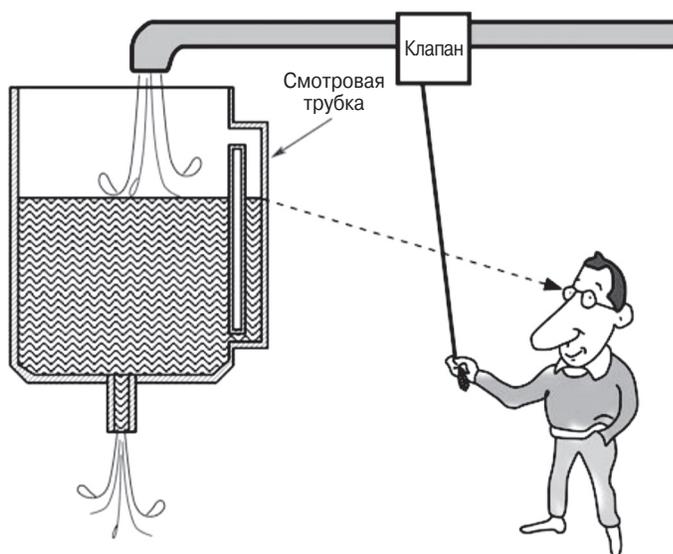


Рис. 1.1. Система контроля за уровнем воды. Смотровая трубка и глаз оператора формируют датчик (устройство, преобразующее информацию в электрический сигнал)

Для принятия правильного решения оператору необходимо постоянно получать информацию об уровне воды в резервуаре. В рассматриваемом примере информация поступает от датчика, состоящего из двух основных частей: смотровой трубки на резервуаре и глаза оператора, подающего импульсы на зрительный нерв. Сами по себе ни глаз оператора, ни смотровая трубка не являются датчиками, но их комбинация формирует детектор, обладающий избирательной способностью определять уровень жидкости. При корректном проектировании системы изменение уровня жидкости в резервуаре быстро отразится на уровне жидкости в смотровой трубке, поэтому можно сказать, что рассматриваемый датчик характеризуется хорошей реакцией или малой инерционностью. Но если внутренний диаметр трубки будет слишком мал для вязких жидкостей, уровень в ней будет отставать от уровня в резервуаре. Поэтому необходимо учитывать фазовые характеристики такого датчика. Для некоторых применений такая задержка может быть приемлемой, тогда как для других надо использовать иную конструкцию смотровой трубки. Отсюда видно, что рабочие характеристики каждого датчика можно оценить только относительно конкретной системы сбора данных.

Окружающий нас мир можно разделить на две части: природа и объекты, созданные человеком. Естественные сенсоры, которыми снабжен любой живой организм, обычно реагируют на электрохимические сигналы, т.е. их физический принцип действия основывается на передаче ионов в нервных тканях, как это было в рассмотренном примере со зрительным нервом оператора. В системах же, созданных людьми, в передаче сигналов участвуют электроны. Датчики в таких системах «разговаривают» с устройствами, в которые они встроены, на одном языке. Язык общения здесь — электрические сигналы, а датчик должен обладать возможностью формировать выходные сигналы, в которых информация передается при помощи смещения электронов, реже — ионов. (Хотя в оптических системах связи информация передается через фотоны, но этот раздел выходит за рамки книги.) В данной книге будут рассматриваться датчики, которые могут быть подключены к измерительной системе при помощи электрических проводов, а не через электрохимические растворы и нервные волокна. Исходя из этого, перефразируем определение датчика.

Датчик — это устройство, воспринимающее внешние воздействия и реагирующее на них изменением электрических сигналов.

Термин «*внешние воздействия*» широко используется в этой книге, поэтому его необходимо правильно понимать. Под внешним воздействием понимается количественная характеристика объекта, его свойство или качество, которые необходимо воспринять и преобразовать в электрический сигнал. Примерами внешних воздействий могут служить интенсивность и длина волны света, звук, сила, ускорение, расстояние, темп движения и химический состав. Когда мы говорим «электрический», то подразумеваем сигнал, который может быть направлен, усилен и преобразован при помощи электрических устройств. В некоторых книгах (например [2]) для этих целей используется термин «*измеряемая величина*», имеющий аналогичное значение, однако в этом термине делается акцент на количественной характеристике сенсорной функции.

Назначение датчиков — реакция на определенное внешнее физическое воздействие и преобразование его в электрический сигнал, совместимый с измеритель-

ными схемами. Другими словами, можно сказать, что датчик — это преобразователь физической величины (часто неэлектрической) в электрический сигнал. Под термином «*электрический сигнал*» понимается сигнал, который может быть преобразован при помощи электронных устройств, например усилен или передан по линии передач. Выходными сигналами датчиков могут быть напряжение, ток или заряд, которые описываются следующими характеристиками: амплитудой, частотой, полярностью, фазой или цифровым кодом. Этот набор характеристик называется *форматом выходного сигнала*. Таким образом, каждый датчик характеризуется набором входных параметров (любой физической природы) и набором выходных электрических параметров.

Любой датчик является преобразователем энергии. Вне зависимости от типа измеряемой величины всегда происходит передача энергии от исследуемого объекта к датчику. Работа датчика — это особый случай передачи информации, а любая передача информации связана с передачей энергии. Очевидным является тот факт, что передача энергии может проходить в двух направлениях, т.е. она может быть как положительной, так и отрицательной: например, энергия может передаваться от объекта к датчику и, наоборот, от датчика к объекту. Особым случаем является ситуация, при которой поток чистой энергии равен нулю, но и в этом случае происходит передача информации о существовании именно такой особой ситуации. Например, инфракрасный датчик температуры вырабатывает положительное напряжение, когда объект теплее датчика (инфракрасное излучение направлено в сторону датчика), или отрицательное напряжение, когда объект холоднее датчика (инфракрасное излучение направлено от датчика на объект). Когда датчик и объект имеют одинаковую температуру, инфракрасный поток равен нулю и выходное напряжение также равно нулю. В этой ситуации и заключена информация о равенстве температур датчика и объекта.

Термины «*датчик*» и «*детектор*» — близкие по значению синонимы, их часто используют вперемешку. Однако термин «детектор» гораздо чаще используется в тех случаях, когда речь идет о качественных измерениях, а не количественных. Например, пассивный инфракрасный детектор используется для фиксации факта движения человека, но не для измерения направления, скорости или ускорения этого движения.

Понятие «*датчик*» необходимо отличать от понятия «*преобразователь*». Преобразователь конвертирует один тип энергии в другой, тогда как датчик преобразует любой тип энергии внешнего воздействия в электрический сигнал. Примером преобразователя может служить громкоговоритель, конвертирующий электрический сигнал в переменное магнитное поле для последующего формирования акустических волн. Здесь речь не идет ни о каком восприятии внешней информации. (Интересно отметить тот факт, что, если громкоговоритель подключить ко входу усилителя, он будет работать как микрофон. В этом случае его можно назвать акустическим датчиком.) Преобразователи могут выполнять также функции *приводов*. Привод можно определить как устройство, противоположное датчику, поскольку он преобразует электрическую энергию, как правило, в неэлектрическую энергию. Примером привода является электрический мотор, преобразующий электрическую энергию в механическую, или пневматический привод, приводимый в действие электрическим сигналом и преобразующий давление воздуха в силу.

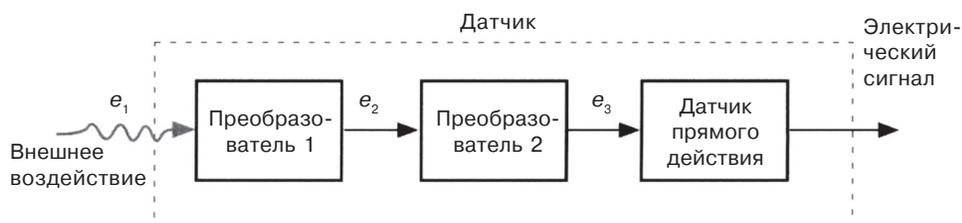


Рис. 1.2. Датчик может состоять из нескольких преобразователей; e_1, e_2, \dots — различные виды энергии. Отметим, что последний элемент данной схемы является датчиком прямого действия

Преобразователи могут быть частью гибридных или составных датчиков (рис. 1.2). Например, в состав химического датчика могут входить два преобразователя, один из которых конвертирует энергию химических реакций в тепло, а другой, термоэлемент, преобразовывает полученное тепло в выходной электрический сигнал. Комбинация этих двух преобразователей представляет собой химический датчик — устройство, вырабатывающее электрический сигнал в ответ на химическую реакцию. Отметим, что в рассмотренном примере химический датчик является составным датчиком, состоящим из неэлектрического преобразователя и еще одного датчика прямого действия, преобразующего тепловую энергию в электрическую. В структуру составных датчиков, как правило, входят хотя бы один датчик прямого действия и несколько преобразователей. *Датчиками прямого действия* называют датчики, которые построены на физических явлениях, позволяющих проводить непосредственное преобразование энергии внешнего воздействия в электрические сигналы или их модуляцию. Примерами таких физических явлений являются фотоэффект и эффект Зеебека, описываемые в третьей главе.

Таким образом, все датчики можно разделить на две группы: датчики прямого действия и составные датчики. Датчики прямого действия преобразуют внешнее воздействие непосредственно в электрический сигнал, используя для этого соответствующее физическое явление, в то время как в составных датчиках, прежде чем получить электрический сигнал на выходе окончательного датчика прямого действия, необходимо осуществить несколько преобразований энергии.

На практике датчики не работают сами по себе. Как правило, они входят в состав измерительных систем, часто довольно больших, объединяющих много разных детекторов, преобразователей сигналов, сигнальных процессоров, запоминающих устройств и приводов. Датчики в таких системах могут быть как наружными, так и встроенными. Часто их располагают на входах измерительных приборов для того, чтобы они реагировали на внешние воздействия и сообщали системе об изменениях в окружающих условиях. Также они размещаются внутри измерительных систем для мониторинга их функционирования, что необходимо для поддержания корректной работы всех внутренних устройств. Датчики являются неотъемлемой частью систем сбора данных, которые, в свою очередь, могут входить в состав больших измерительных комплексов со множеством обратных связей.

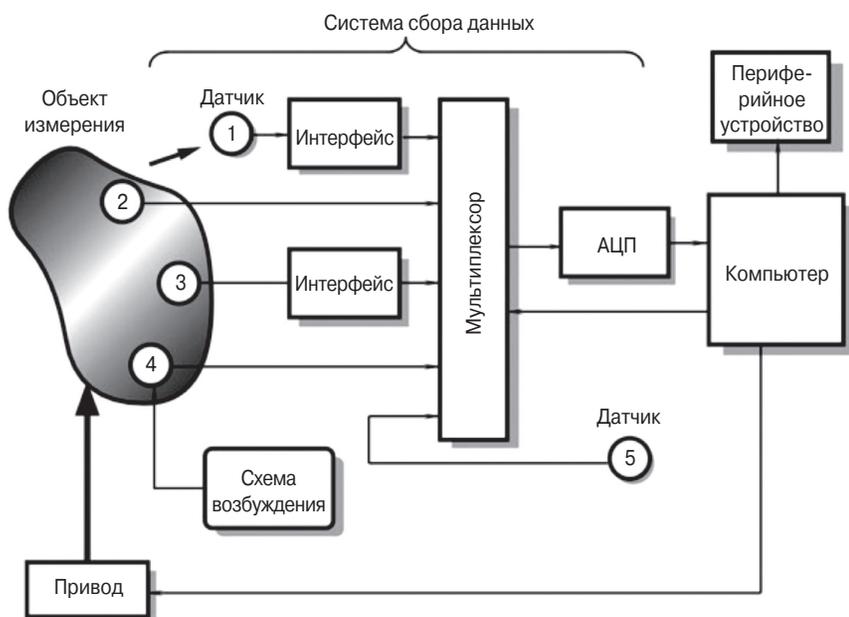


Рис. 1.3. Автоматизированный измерительный комплекс, показывающий роль датчиков в системе сбора данных. Датчик 1 является бесконтактным, датчики 2 и 3 – пассивными устройствами, датчик 4 – активным, а датчик 5 – внутренним элементом системы сбора данных

На рис. 1.3 показана блок-схема автоматизированного измерительного комплекса, состоящего из системы сбора данных и управляющего устройства. Из этого рисунка хорошо видна роль датчиков в таких системах. Субъектами измерений могут быть любые материальные объекты: автомобили, космические корабли, человеческие тела, различные жидкости и газы. Данные об измеряемом объекте собираются при помощи датчиков, часть из которых (2, 3 и 4) располагается на поверхности или внутри объекта. Датчик 1 не имеет непосредственной связи с объектом, т.е. является *бесконтактным*. Телевизионные камеры и детекторы излучений служат примерами таких датчиков. Даже когда датчик называется бесконтактным, всегда между ним и объектом происходит передача энергии.

Датчик 5 может выполнять различные функции. Часто он служит для контроля за условиями внутри самой системы сбора данных. Датчики 1 и 3 не могут быть напрямую подсоединены к стандартным электронным схемам из-за несоответствия форматов выходных сигналов. Для их подключения требуются специальные интерфейсные устройства – преобразователи сигналов. Датчики 1, 2, 3 и 5 являются пассивными, поскольку для формирования выходных сигналов им не требуется дополнительная электрическая энергия. Датчик 4 – пример активных устройств. Для обеспечения его работы необходим вспомогательный сигнал, получаемый от схемы возбуждения. При этом датчик модулирует этот сигнал в соответствии с изменением измеряемого параметра. Одним из активных датчиков является температурно-чувствительный резистор, который часто называется термистором. Такой датчик работает от источника постоянного тока, являющегося в данном

случае схемой возбуждения. Измерительный комплекс может включать в себя либо один датчик (домашний термостат), либо несколько тысяч (космический корабль).

Электрические сигналы с выходов датчиков поступают на мультиплексор, выполняющий роль переключателя. Если выходные сигналы датчиков являются аналоговыми, они поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), если цифровыми – непосредственно на компьютер, который синхронизирует работу мультиплексора и АЦП, а также посылает управляющие сигналы на привод, воздействующий непосредственно на объект. В качестве приводов могут использоваться электрические моторы, соленоиды, реле и пневматические клапаны. В состав измерительной системы также входят периферийные устройства (накопители данных, дисплеи, сигнализаторы и т.д.) и другие компоненты, не показанные в блок-схеме. Такими компонентами могут быть фильтры, схемы выборки и хранения, усилители и прочие преобразователи.

Для иллюстрации того, как такая схема работает, рассмотрим простую систему, контролирующую закрытие дверей в автомобиле. Каждая дверь автомобиля оснащена датчиком, определяющим ее состояние (открыта она или закрыта). В большинстве машин в качестве такого датчика используется обыкновенный электрический выключатель. Сигналы от датчиков всех дверей поступают на встроенный микропроцессор автомобиля (здесь нет необходимости использовать АЦП, поскольку сигналы датчиков являются цифровыми: 0 – дверь открыта, 1 – закрыта). Микропроцессор определяет, какая из дверей открыта, и посылает на соответствующее периферийное устройство (приборную панель или звуковой сигнализатор) специальный сигнал. Водитель автомобиля (в качестве привода) получает это сообщение и воздействует на объект, т.е. закрывает дверь, после чего датчик выдает выходной сигнал 1.

Примером более сложной системы является дозатор паров анестезирующих веществ, применяемый в медицине для регулирования количества анестетиков, вдыхаемых пациентом в ходе хирургических операций. В такую систему входят несколько активных и пассивных датчиков. Концентрация паров анестезирующих веществ контролируется при помощи пьезоэлектрического датчика, установленного в отводной трубке. Молекулы анестетиков увеличивают массу пьезокристалла, тем самым изменяя частоту его колебаний. Величина изменения собственной частоты кристалла и является мерой концентрации паров анестезирующих веществ. Чтобы отличить вдох от выдоха, применяется датчик, контролирующий уровень CO_2 . В дополнение к этому для компенсации некоторых переменных составляющих в системе используются датчики температуры и давления. Сигналы от всех этих датчиков поступают на мультиплексор, оцифровываются и подаются в микропроцессор, который и определяет реальную концентрацию паров анестезирующих веществ. Анестезиолог задает требуемый уровень подачи анестетиков, а процессор, управляя соответствующим образом приводом (в данном случае клапанами), поддерживает необходимую концентрацию анестезирующих веществ.

На рис. 1.4 показан комплекс, состоящий из комбинации различных датчиков, приводов и сигнализаторов, применяемый в корпорации Nissan для повышения безопасности автомобиля. В его состав входят две системы, борющиеся с засыпанием водителя за рулем автомобиля. Действие одной из этих систем направлено на предупреждение водителя, а другой – на выравнивание курса автомобиля.

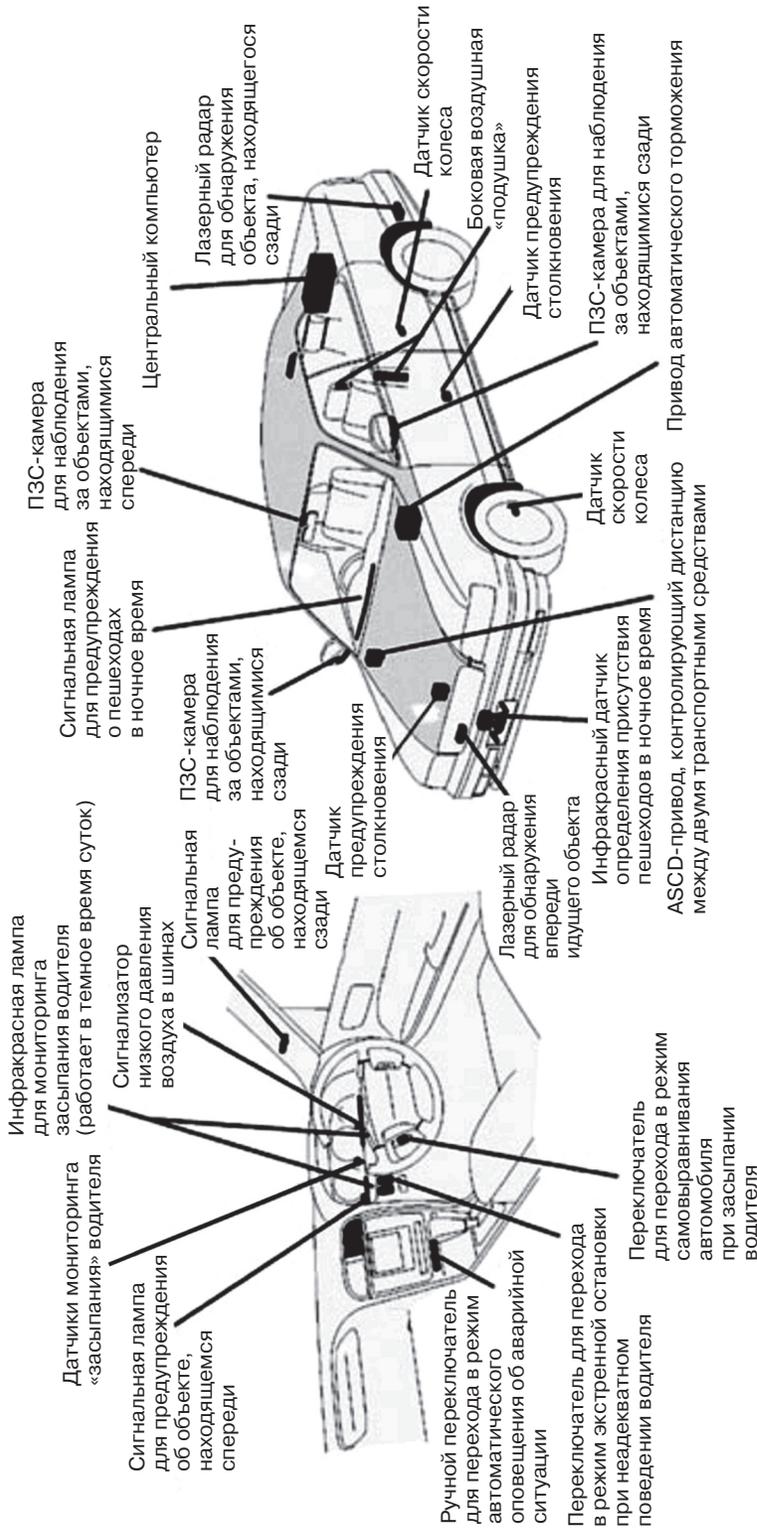


Рис. 1.4. Система безопасности автомобиля (с разрешения Nissan Motor Company)

Для выполнения этих функций необходимы специальные датчики, роль которых могут играть сенсоры слежения за глазным яблоком водителя и детекторы наклона его головы. В систему выдачи сигнала необходимости экстренного торможения, построенную на основе датчиков микроволнового, ультразвукового и инфракрасного диапазонов, часто входит устройство опережающего включения индикаторов торможения, позволяющее заранее предупредить об опасности водителей транспортных средств, едущих сзади. В состав системы предупреждения о препятствиях входят инфракрасные детекторы и радар. Адаптивная система круиз-контроля начинает работать в момент, когда водитель слишком приблизился к впереди идущему транспортному средству, при этом скорость автомобиля немедленно снижается для обеспечения безопасной дистанции. Устройство мониторинга пешеходов определяет присутствие людей на дороге в темное время суток и в зонах, закрытых для обзора, и предупреждает об этом водителя автомобиля. Система контроля полосы движения определяет ситуации, при которых отклонение автомобиля происходит не по воле водителя. При этом система оповещает водителя об уходе с полосы и автоматически выравнивает транспортное средство.

В следующих главах будут подробно рассмотрены типы сенсорных элементов, физические основы работы датчиков, их конструктивные решения и электронные схемы интерфейсных устройств. Описания других важных элементов измерительных комплексов, таких как приводы, дисплеи, накопители данных, передающие устройства, не вошли в эту книгу, и о них будет встречаться только краткое упоминание.

Входные сигналы датчиков (внешние воздействия) могут иметь практически любую физическую или химическую природу. Поток света, температура, давление, колебания, перемещение, положение, скорость, концентрация ионов – все это примеры внешних воздействий. Конструкция датчиков меняется в зависимости от их предназначения. Она может быть обычного типа, для широкого спектра применений. Для особых условий применения может потребоваться разработка специальных корпусов и схем монтажа. Например, пьезорезистивный датчик для измерения кровяного давления внутри аорты монтируется в герметичном корпусе и имеет очень миниатюрные размеры для возможности прохождения через микрокатетер. Корпус того же самого датчика будет совсем другим для случая применения внутри надувной манжеты медицинского тонометра. Иногда от датчиков требуется, чтобы они реагировали только на определенный диапазон входных сигналов. Например, детектор движения в охранной системе должен срабатывать только на перемещение людей и никак не реагировать на передвижение маленьких животных, таких как собаки и кошки.

1.2. Классификация датчиков

Системы классификации датчиков могут быть очень разными: от очень простых до сложных. Критерий классификации всегда выбирается в зависимости от цели проведения классификации. В этой книге предлагается несколько практических подходов к этой проблеме.

Все датчики можно разделить на две категории: **пассивные** и **активные**. Пассивный датчик не нуждается в дополнительном источнике энергии и в ответ на изменение внешнего воздействия на его выходе всегда появляется электрический сигнал. Это означает, что такой датчик преобразует энергию внешнего сигнала в выходной сигнал. Примерами пассивных датчиков являются термопары, фотодиоды и пьезоэлектрические чувствительные элементы. Большинство пассивных датчиков являются устройствами прямого действия (их определение приведено в разд. 1.1). В отличие от пассивного собрата активный датчик для своей работы требует внешней энергии, называемой *сигналом возбуждения*. При формировании выходного сигнала активный датчик тем или иным способом воздействует на сигнал возбуждения. Поскольку такие датчики меняют свои характеристики в ответ на изменение внешних сигналов, их иногда называют *параметрическими*. Фактически в активных датчиках происходит преобразование изменения их внутренних характеристик в электрические сигналы, т.е. определенные параметры активных датчиков модулируют сигналы возбуждения и эта модуляция несет в себе информацию об измеряемой величине. Например, термисторы являются температурно-чувствительными резисторами. Сами по себе термисторы не производят никаких электрических сигналов, но при прохождении через них электрического тока (сигнала возбуждения) их сопротивление может быть определено по изменению тока и/или падению напряжения на них. Значение сопротивления (в омах) отражает измеряемую температуру, которая может быть найдена по известным зависимостям. Другим примером активных датчиков является резистивный тензодатчик, чье электрическое сопротивление зависит от величины его деформации. Для определения сопротивления датчика через него также необходимо пропустить электрический ток от внешнего источника питания.

В зависимости от выбора точки отсчета датчики можно разделить на **абсолютные** и **относительные**. *Абсолютный* датчик определяет внешний сигнал в абсолютных физических единицах, не зависящих от условий проведения измерений, тогда как выходной сигнал *относительного* датчика в каждом конкретном случае может трактоваться по-разному. Примером абсолютного датчика является термистор. Его электрическое сопротивление напрямую зависит от абсолютной температуры по шкале Кельвина. Другой же популярный датчик температуры – термопара – является относительным устройством, поскольку напряжение на его выходе является функцией градиента температуры на проволочках термопары. Поэтому определить конкретную температуру по выходному сигналу термопары можно только относительно известной базовой точки отсчета. Другим примером абсолютных и относительных датчиков является датчик давления. Показания абсолютного датчика соответствуют значениям давления относительно абсолютного нуля по шкале давлений, т.е. относительно полного вакуума. Относительный датчик определяет давление относительно атмосферного давления, которое не является нулевым.

Другой подход к классификации датчиков заключается в рассмотрении их характеристик, параметры которых могут представлять особый интерес. Для того чтобы отнести датчик к той или иной группе, необходимо знать, какие величины он может измерять, его характеристики, на каком физическом принципе он реа-

лизован, какой механизм преобразований он применяет, из какого материала он изготовлен, какова область его применения. В табл. 1.1–1.5, взятых из книги [3], представлена схема такой классификации, которая является наиболее информативной. Для примера рассмотрим акселерометр на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Согласно приведенным таблицам ему можно дать следующее описание.

Таблица 1.1. Характеристики датчиков

Чувствительность	Диапазон входных значений
Стабильность (краткосрочная и долговременная)	Разрешающая способность
Точность	Избирательность
Быстродействие	Окружающие условия
Характеристики при перегрузке	Линейность
Гистерезис	Мертвая зона
Эксплуатационный ресурс	Формат выходного сигнала
Стоимость, размеры, вес	Другие

Таблица 1.2. Материалы датчиков

Неорганические	Органические
Проводники	Диэлектрики
Полупроводники	Жидкости, газы, плазма
Биологические ткани	Другие

Таблица 1.3. Механизм преобразований

Физические	Термоэлектричество Фотоэлектричество Фотомагнетизм Магнитоэлектричество Электромагнетизм	Химические	Химические преобразования Физические преобразования Электрохимический процесс Спектроскопия Другие
		Биологические	Биохимические преобразования Физические преобразования Влияние на тестируемые организмы Спектроскопия Другие

Таблица 1.4. Области применения

Архитектура	Автомобильный транспорт
Гражданское строительство, проектирование	Домашнее применение
Распределение, торговля, финансы	Окружающая среда, метеорология, средства безопасности
Энергетика	Средства информации, телекоммуникация
Здравоохранение, медицина	Судоходство
Оборонная промышленность	Отдых, развлечения
Научные исследования	Космос
Транспорт (исключая автомобильный)	Другие

Таблица 1.5. Внешние воздействия

Воздействия		Воздействия	
Акустические	Амплитуда волны, фаза, поляризация Спектр Скорость волны Другие	Механические	Положение (координаты линейные и угловые) Ускорение Сила Напряжение, давление Деформация Масса, плотность Движение, момент Скорость потока, расход массы Форма, шероховатость, ориентация Жесткость, податливость Вязкость Упорядоченность структуры, интеграция Другие
Биологические	Биомасса (вид, концентрация, состояние) Другие		
Химические	Элементы (идентичность, концентрация, состояние) Другие		
Электрические	Заряд, ток Потенциал, напряжение Электрическое поле (амплитуда, фаза, поляризация, спектр) Проводимость Диэлектрическая проницаемость Другие		
Магнитные	Магнитное поле (амплитуда, фаза, поляризация, спектр) Магнитный поток Проницаемость Другие	Излучение	Тип Энергия Интенсивность Другие
Оптические	Амплитуда волны, фаза, поляризация, спектр Скорость волны Коэффициент отражения Излучающая способность Отражающая способность, поглощение Другие	Тепловые	Температура Поток Тепло Теплопроводность Другие

1.3. Единицы измерения

В этой книге используются единицы измерения системы СИ, принятые на 14-й Международной конференции по мерам и весам (1971). В табл. 1.7 приведены основные единицы измерения физических величин, взятые из французского справочника *Le Systeme International d'Unites* [4]. Все остальные единицы измерения являются производными от этих основных единиц. Некоторые из них приведены в приложении.

Таблица 1.7. Основные единицы измерения системы СИ

Величина	Название	Обозначение	Определение (год установления)
Длина	Метр	м	Метр — длина пути, пройденного светом в вакууме за время, равное $1/299792458$ доли секунды (1983)
Масса	Килограмм	кг	Килограмм — масса эталона, сделанного из сплава платины и иридия (1889)
Время	Секунда	с	Секунда — длительность 9 192 631 периодов излучения, испускаемого атомом цезия-133 при точно определенных условиях резонанса (1967)
Электрический ток	Ампер	А	Ампер — сила установившегося электрического тока, который, проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенных в вакууме на расстоянии 1 метра друг от друга, вызывает появление силы между ними, равной $2 \cdot 10^{-7}$ Н/м (1946)
Термодинамическая температура	Кельвин	К	Кельвин определяется температурой тройной точки воды (когда все три фазы воды: жидкая, парообразная и твердая — находятся в термодинамическом равновесии). Эта температура равна 273,16 К (1967)
Количество	Моль	моль	Моль — количество элементарных частиц (атомов, вещества молекул, ионов, электронов и др.), содержащихся в 0,012 кг изотопа углерода-12 (1971)
Интенсивность света	Кандела (свеча)	кд	Свеча — сила света, излучаемого в перпендикулярном направлении черным телом, имеющим площадь поверхности $1/600\,000$ м ² , при температуре замерзания Pt и давлении 101 325 Нм ² (1967)
Плоский угол	Радян	рад	Дополнительная единица
Телесный угол	Стерadian	срад	Дополнительная единица

Часто на практике бывает неудобно напрямую использовать основные единицы или их производные, поскольку они могут быть либо слишком большими, либо слишком маленькими. Тогда применяют стандартные множители или делители, приведенные в приложении. При произношении полученных единиц ударение всегда делается на первый слог. Например, 1 ампер (А) при умножении на коэффициент 10^{-3} образует меньшую единицу, называемую миллиампером (мА), равную одной тысячной доле ампера, или 1 килоом (1 кОм) — тысяча ом, где 1 Ом умножается на тысячу.

Иногда используются еще две системы единиц измерения: система Гаусса и британская система, которая в США называется *пользовательской системой США*. Америка является единственной развитой страной, в которой система СИ не является общеупотребимой. Однако в связи с глобализацией система СИ будет также принята и в США. В этой книге в большинстве случаев используется система СИ. Однако для удобства понимания в некоторых местах применяется американская система. Для перевода единиц измерения других систем в систему СИ читатель может воспользоваться таблицами, приведенными в приложении (номенклатура, аббревиатура и произношение многих единиц взяты из работы «Standard practice for use of the International System of units (SI)». Standard E380-91a. ©1991 ASTM, West Conshocken, PA.) Для перевода любой единицы в систему СИ ее необходимо умно-

жить на коэффициент, указанный в таблице. Например, для перевода ускорения 55 фут/с² в систему СИ надо умножить это значение на коэффициент 0,3048:

$$55 \text{ фут/с}^2 \times 0,3048 = 16,764 \text{ м/с}^2.$$

Подобным образом можно преобразовать значение электрического заряда 1,7 фарадей:

$$1,7 \text{ фарадей} \times 9,65 \times 10^{19} = 1,64 \times 10^{20} \text{ Кл.}$$

Читатель должен понимать как физическую, так и техническую терминологию, принятую в разных странах. Например, в США и многих других странах разность потенциалов называется «*вольтаж*», тогда как в остальных странах – «*электрическое напряжение*» или просто «*напряжение*». В этой книге будет часто встречаться терминология, принятая в США.

Литература

1. Thompson, S. (1989). Control systems: Engineering & design. Essex, England: Longman Scientific & Technical.
2. Norton, H.N. (1989). Handbook of transducers. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
3. White, R.W. (1991). A sensor classification scheme. In Microsensors (pp. 3–5). New York: IEEE Press.
4. Thompson, A., & Taylor, B.N. (2008). Guide for the use of the international system of units (SI). NIST Special Publication 811, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, March 2008.

ГЛАВА 2

ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Все управляется вероятностями.
Я бы хотел знать, кто контролирует вероятность.

Станислав Ежи Лец

Как правило, внешние воздействия на датчик не имеют электрической природы и для формирования выходного электрического сигнала в датчике происходят несколько последовательных преобразований энергии. Например, внешнее давление, воздействуя на оптоволоконный датчик давления, деформирует оптоволокно, что приводит к изменению его показателя преломления, в результате чего уменьшается светопропускание и модулируется поток фотонов, регистрируемый фотодиодом, преобразующим его энергию в электрический ток. В этой главе мы обсудим общие характеристики датчиков вне зависимости от их физической природы или последовательностей стадий преобразования сигнала внутри датчика. В рамках наших представлений датчик будет представлять собой «черный ящик», в котором мы будем рассматривать только взаимосвязь между входными сигналами и выходным электрическим сигналом, не рассматривая процессов, протекающих внутри датчика. Кроме того, детально обсудим ключевой вопрос чувствительности — определение неизвестных входных сигналов по выходному электрическому сигналу датчика. Произведя вычисления, мы выясним, как связаны входной сигнал с выходным и наоборот.

2.1. Математические модели

Идеальная, или теоретическая, взаимосвязь между вводом и выводом (воздействие-реакция) существует для каждого датчика. Если датчик идеально разработан и изготовлен из идеальных материалов идеальными рабочими в идеальной среде с использованием идеальных инструментов, его выходной сигнал всегда воспроизведет истинное значение величины внешнего воздействия. Эта идеальная взаимосвязь ввода-вывода может быть выражена в виде таблицы величин, графиков, математической формулы или быть решением математического уравнения. Если функция ввода-вывода инвариантна по времени (не изменяется с течением времени), то ее обычно называют статической функцией передачи или просто функцией передачи. Этот термин будет использоваться в дальнейшем в этой книге.

Статическая функция передачи представляет соотношение между входным воздействием s и электрическим сигналом E на выходе датчика. Это соотношение может быть выражено функцией $E = f(s)$. Как правило, воздействие s становится известным только после измерения выходного сигнала E . Величина E , ставшая известной во

время измерения, представляет собой число (напряжение, ток, цифровой счетчик, и т.д.), воспроизводящее воздействие s . Задача разработчика датчика состоит в том, чтобы это представление было как можно ближе к истинному значению воздействия s .

На практике любой датчик подсоединен к измерительной системе. Одной из функций этой системы является «взлом кода E », то есть определение неизвестной величины s по измеренной величине E . Следовательно, измерительная система должна выполнить обратное преобразование $s = f^{-1}(E) = F(E)$, чтобы получить (вычислить) величину воздействия s . Обычно это необходимо для нахождения функции передачи не одиночного датчика, а всей системы, состоящей из самого датчика и схемы его подключения.

На рис. 2.1 представлена функция передачи термоанемометра — датчика, измеряющего расход текучей среды. В общем случае он может быть промоделирован с помощью функции квадратного корня $f(s)$ от скорости входного воздушного потока. Вывод датчика может быть как в вольтах, так и в виде цифровых отсчетов, получаемых от аналого-цифрового преобразователя (АЦП), как показано на оси y рис. 2.1 для 10-битного АЦП-преобразователя. После того как данные выходного счетчика $n = f(s)$ измерены, они должны быть переведены в величину расхода текучей среды при помощи обратной функции передачи. Обратная функция $F(s)$ к монотонной функции квадратного корня $f(s)$ представляет собой параболу. Эта парабола, показанная на рис. 2.1б, демонстрирует связь между выходным счетчиком (или вольтами) и входным расходом текучей среды. Графически обратная функция может быть получена при помощи *зеркального отражения* относительно биссектрисы прямого угла, образуемого осями x и y .

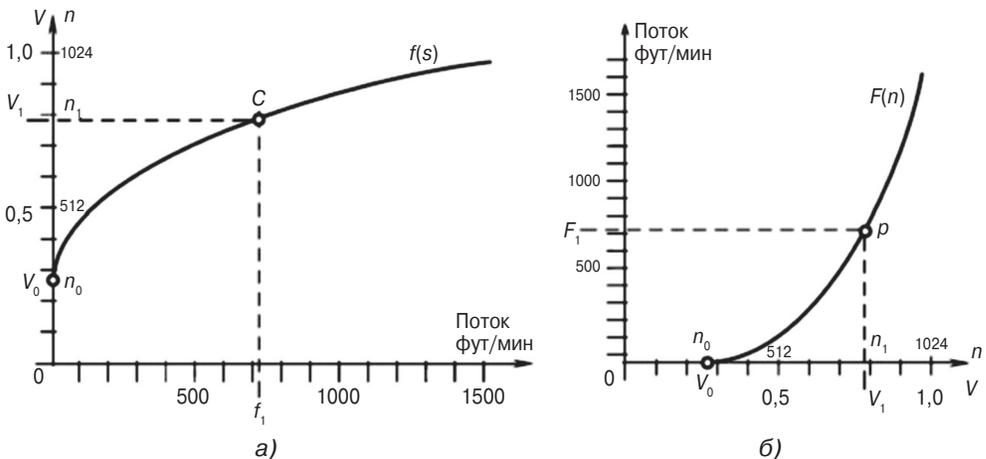


Рис. 2.1. Функция передачи (а) и обратная функция передачи (б) термоанемометра

2.1.1. Концепция

Желательно, чтобы физический или химический закон, на котором работает датчик, был известен. Если этот закон может быть выражен в виде математической формулы, то ее можно использовать для расчета обратной функции передачи датчика путем инверсии и вычисления неизвестной величины s из измеренной выходной

величины E . Рассмотрим, например, линейный резистивный потенциометр, использующийся для измерения смещения d (в этом случае – воздействие s). Для вычисления функции передачи можно применить закон Ома, как показано на рис. 8.1. В этом случае электрический выходной сигнал E – это измеряемое напряжение v , а обратную функцию передачи можно представить как

$$d = F(E) = \frac{D}{v_0} v, \quad (2.1)$$

где v_0 – опорное напряжение, а D – максимальное смещение (на всем диапазоне), причём обе эти величины – константы. Используя эту функцию, можно рассчитать смещение d с помощью измеренного напряжения v .

На практике готовых решаемых аналитически формул для многих функций передачи, особенно для сложных датчиков, не существует, и необходимо прибегать к различным аппроксимациям прямой и обратной передаточных функций, что будет рассмотрено в следующей главе.

2.1.2. Аппроксимация функций

Аппроксимация – это выбор подходящего математического выражения, которое максимальным образом соответствует экспериментальным данным. Аппроксимацию можно представить как *подгонку* теоретически полученной функции к экспериментальной кривой. Аппроксимирующая функция должна быть достаточно простой для вычислений и обращения (инверсии), а также других математических преобразований, например вычисления производной функции для нахождения чувствительности датчика. Выбор такой функции требует математических навыков. Не существует однозначного метода для выбора наиболее точно аппроксимирующей экспериментальные данные функции, часто это приходится делать «на глаз» и основываясь на прошлом опыте, который может быть накоплен только в результате практической деятельности. Изначально нужно проверить, подходит ли для аппроксимации одна из основных функций, а затем попытаться перейти к более общей технике подгона функции, например полиномиальной аппроксимации, как это будет описано ниже. Далее показаны наиболее частые функции, используемые для аппроксимаций функций передачи.

Простейшей моделью функции передачи является *линейная* функция. Она описывается следующим уравнением:

$$E = A + Bs. \quad (2.2)$$

Как показано на рис. 2.2, график этой функции – прямая линия с точкой пересечения A , которая представляет собой выходной сигнал E при входном сигнале $s = 0$. B – наклон кривой.

Иногда его называют *чувствительностью*, поскольку этот коэффициент тем больше, чем сильнее внешнее воздействие. Наклон B равен тангенсу угла α . Выходной сигнал E может быть амплитудой напряжения или тока, фазой, частотой, широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) или цифровым кодом в зависимости от свойств датчика, способа согласования сигнала или схемы подключения датчика.

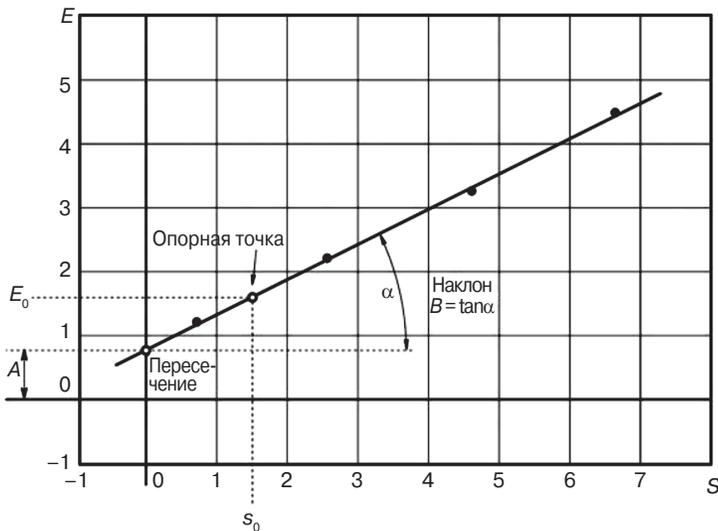


Рис. 2.2. Линейная функция передачи. Черные точки соответствуют экспериментальным данным

Отметим, что уравнение (2.2) означает, что функция передачи проходит, по крайней мере в теории, через нулевое значение входного воздействия s . В большинстве практических случаев испытать датчик в нулевой точке либо очень сложно, либо вообще невозможно. Например, датчик температуры, использующий шкалу Кельвина, не может быть испытан при температуре абсолютного нуля ($-273,15^\circ\text{C}$). Следовательно, во многих линейных или квазилинейных датчиках желательно ссылаться не на точку нуля, а на некоторое опорное значение s_0 . Если реакция датчика E_0 соответствует некоторому входному воздействию s_0 , то формулу (2.2) можно записать в более практичном виде:

$$E = E_0 + B(s - s_0). \quad (2.3)$$

Опорная точка имеет координаты s_0 и E_0 . В частном случае $s_0 = 0$ уравнение (2.3) преобразуется в (2.2) и $E_0 = A$. Обратная линейная функция передачи для вычисления входного воздействия от выходного E представима в виде

$$s = \frac{E - E_0}{B} + s_0. \quad (2.4)$$

Отметим, что три константы должны быть известны для вычисления внешнего воздействия s : чувствительность B и координаты s_0 и E_0 опорной точки.

Линейных датчиков очень немного. В действительности небольшая нелинейность присутствует всегда, особенно в широких интервалах внешних воздействий. Следовательно, уравнения (2.2) и (2.3) представляют собой линейную аппроксимацию нелинейных датчиков, в которых нелинейностью можно пренебречь. Во многих случаях, когда нелинейностью пренебречь нельзя, функция передачи все же может быть аппроксимирована набором линейных функций, как это будет более детально показано ниже (см. разд. 2.1.6).

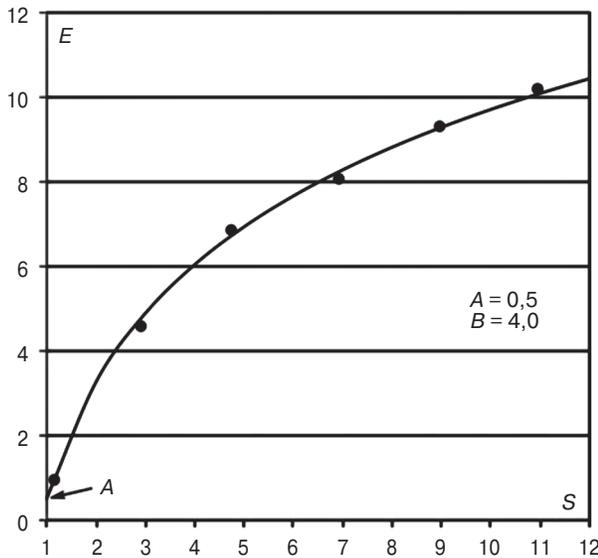


Рис. 2.3. Аппроксимация логарифмической функции. Точки соответствуют экспериментальным данным

Нелинейная функция передачи может быть аппроксимирована нелинейной математической функцией. Приведем несколько полезных функций.

Логарифмическая функция (рис. 2.3) и соответствующая обратная функция (экспоненциальная) — соответственно

$$E = A + B \ln s, \quad (2.5)$$

$$s = e^{\frac{E-A}{B}}, \quad (2.6)$$

где A и B — константы.

Экспоненциальная функция (рис. 2.4) и ее обратная функция (логарифмическая) — соответственно

$$E = Ae^{ks}, \quad (2.7)$$

$$s = \frac{1}{k} \ln \frac{E}{A}, \quad (2.8)$$

где A и k — константы.

Степенная функция (рис. 2.5) и ее обратная функция могут быть выражены как

$$E = A + Bs^k, \quad (2.9)$$

$$s = \sqrt[k]{\frac{E-A}{B}}, \quad (2.10)$$

где A и B — константы, а k — показатель функции.

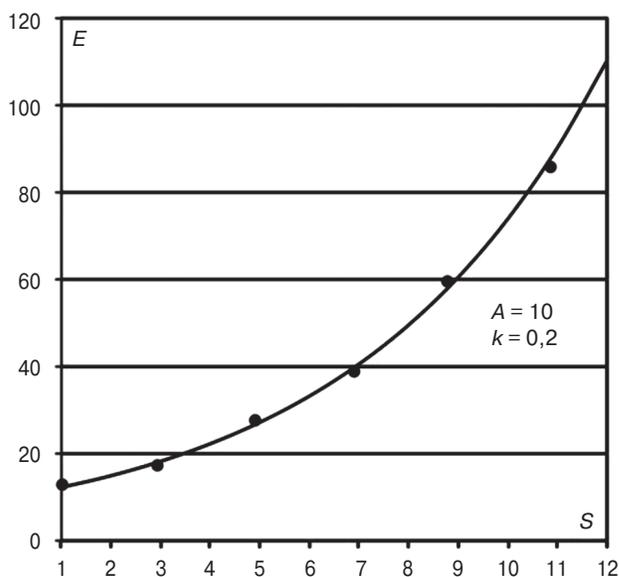


Рис. 2.4. Аппроксимация экспоненциальной функцией. Точки соответствуют экспериментальным данным

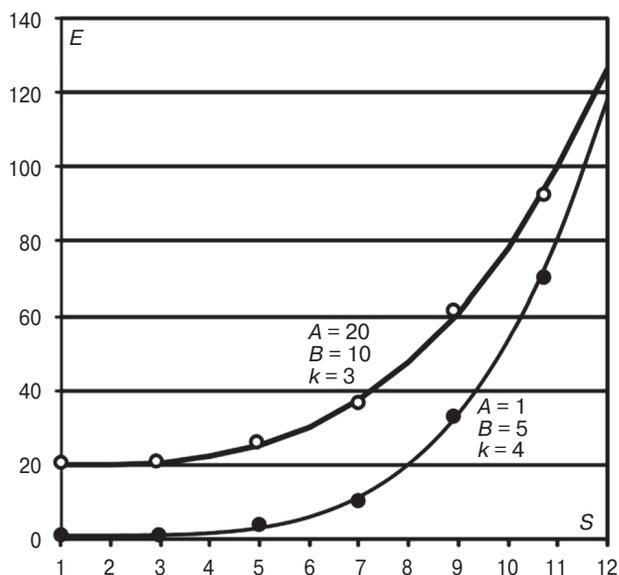


Рис. 2.5. Степенные функции

Все три нелинейные аппроксимации содержат небольшое число параметров, которые нужно определить во время калибровки. Небольшое число параметров достаточно удобно, поскольку позволяет легко подогнать выходной сигнал конкретного датчика под конкретную функцию. Всегда нужно стремиться аппроксимировать таким образом, чтобы подгоночных параметров было как можно меньше: это облегчает и удешевляет аппроксимацию при калибровке датчика. Чем меньше

подгоночных параметров, тем меньше измерений нужно выполнить при калибровке датчика.

2.1.3. Линейная регрессия

Если измерения входного воздействия на датчик во время калибровки не могут быть выполнены непрерывным образом с высокой точностью или возникает большое количество случайных ошибок, минимальное число измерений не будет соответствовать необходимой точности измерений. Для исключения случайных ошибок в процессе калибровки применяется *метод наименьших квадратов* для нахождения угла наклона кривой и точки пересечения. Поскольку этот метод описан во многих книгах и руководствах по проведению измерений, мы приведем только заключительные выражения для неизвестных параметров в случае линейной регрессии. Рекомендуем обратиться к любому учебнику по статистическому анализу. Процедура состоит в следующем.

1. Измеряется множество значений (k) выходной величины E от значений входной величины s в достаточно широком диапазоне измерений, преимущественно во всем диапазоне измерений датчика.
2. Для определения точки пересечения A и величины наклона B прямой, наиболее точно аппроксимирующей выражение (2.2), применяются следующие формулы линейной регрессии:

$$A = \frac{\Sigma E \Sigma s^2 - \Sigma s \Sigma s E}{k \Sigma s^2 - (\Sigma s)^2}, \quad B = \frac{k \Sigma s E - \Sigma s \Sigma E}{k \Sigma s^2 - (\Sigma s)^2}, \quad (2.11)$$

где Σ — результат суммирования значений всех k измерений. После нахождения всех постоянных A и B уравнение (2.2) может использоваться для линейной аппроксимации экспериментальной функции передачи.

2.1.4. Полиномиальная аппроксимация

Датчик может обладать функцией передачи, для которой ни одна из вышеописанных аппроксимаций не является достаточно точной. Разработчик датчика с хорошей математической подготовкой и физической интуицией может попытаться применить некоторые отличные от описанных аппроксимаций, но если таковые не будут найдены, существуют старые и надежные методы нахождения аппроксимирующей функции вручную. Одним из таких методов является полиномиальная аппроксимация, то есть степенной ряд.

Любая непрерывная функция, независимо от своей формы, может быть аппроксимирована степенным рядом. Например, экспоненциальная функция, показанная на рис. 2.7, может быть аппроксимирована полиномом третьего порядка путем отбрасывания старших членов ряда¹:

¹ Эта аппроксимация полиномом третьего порядка дает хорошие результаты, только если $ks \ll 1$. В общем случае ошибка аппроксимации степенным рядом является объектом нетривиального математического анализа. К счастью, в большинстве практических применений этот анализ очень редко действительно необходим.

$$E = Ae^{ks} \approx A \left(1 + ks + \frac{k^2}{2!} s^2 + \frac{k^3}{3!} s^3 \right). \quad (2.12)$$

Во многих случаях важно понимать, может ли реакция датчика быть аппроксимирована полиномами второй или третьей степени при хорошем соответствии экспериментальным данным. Эти аппроксимирующие функции могут быть выражены в виде

$$E = a_2 s^2 + a_1 s + a_0; \quad (2.13)$$

$$E = b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0. \quad (2.14)$$

Коэффициенты a и b являются константами, позволяющими изменять форму кривых (2.13) и (2.14) для самых разных реальных функций передачи. Следует понимать, что квадратичный (второго порядка) полином уравнения (2.13) является частным случаем полинома третьего порядка при $b_3 = 0$ в уравнении (2.14). Аналогично полином первого порядка (линейный) уравнения 2.2 является частным случаем квадратичного полинома уравнения (2.13) при $a_2 = 0$.

Очевидно, что данная методика применима и к обратной функции передачи. Следовательно, обратная функция передачи может быть аппроксимирована полиномами второй и третьей степени:

$$s = A_2 E_2 + A_1 E + A_0; \quad (2.15)$$

$$s = B_3 E_3 + B_2 E^2 + B_1 E + B_0. \quad (2.16)$$

Коэффициенты A и B могут быть преобразованы в a и b , однако аналитическое преобразование, как правило, очень громоздко и используется редко. Вместо этого при необходимости прямая или обратная функция передачи аппроксимируются по экспериментальным точкам, но не одновременно.

Во многих случаях, когда требуется особая точность, для лучшей аппроксимации применяют полиномы высших порядков. Тем не менее даже полином второго порядка может обеспечить необходимую точность аппроксимации для достаточно узкого диапазона величин входных воздействий при условии, что функция передачи монотонна (без минимумов и максимумов).

2.1.5. Чувствительность

Напомним, что коэффициент B в уравнениях (2.2) и (2.3) называется *чувствительностью*. В случае нелинейной функции передачи чувствительность не представляет собой фиксированное число, как при линейной функции передачи. Нелинейная функция передачи демонстрирует разную чувствительность в различных точках внутри диапазона изменений внешнего воздействия. В случае нелинейной функции передачи чувствительность определяется как первая производная функции передачи при данном внешнем воздействии s_i :

$$b_i(s_i) = \frac{dE(s_i)}{ds} = \frac{\Delta E_i}{\Delta s_i}, \quad (2.17)$$

где Δs_i – малое приращение входного воздействия, а ΔE_i – соответствующее изменение E на выходе датчика.

2.1.6. Кусочно-линейная аппроксимация

Кусочно-линейная аппроксимация – мощный метод, применяемый в компьютеризированных системах сбора данных. Суть его состоит в том, чтобы разложить нелинейную функцию передачи произвольной формы на участки, каждый из которых может быть аппроксимирован при помощи линейных функций, по аналогии с уравнениями (2.2) или (2.3). Изогнутые участки между выбранными точками (узлами), разделяющими функцию на сегменты, заменяются на прямолинейные отрезки, что значительно упрощает поведение функции между узлами. Другими словами, узлы графически соединяются прямыми линиями. Это также можно представить как полиномиальную аппроксимацию исходной нелинейной функции. На рис. 2.6 демонстрируется кусочно-линейная аппроксимация нелинейной функции с узлами, когда входные величины s_0, s_1, s_2, s_3, s_4 соответствуют выходным величинам n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 (в данном случае приведены данные цифрового счетчика АЦП).

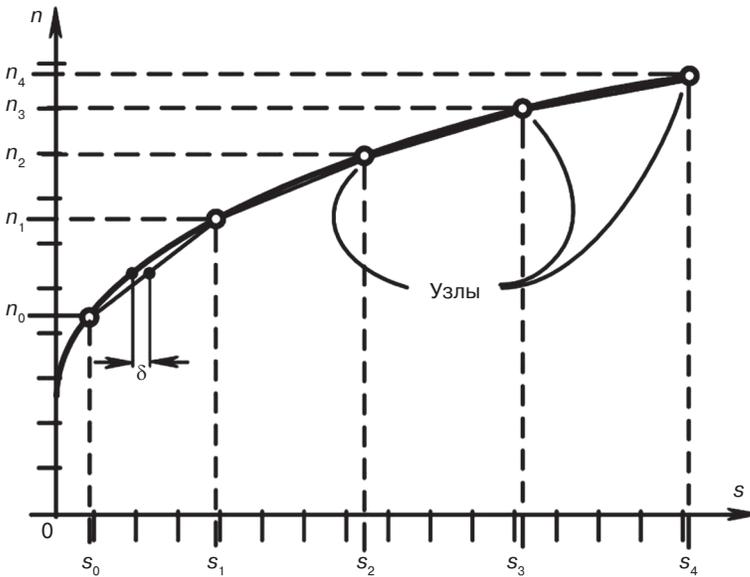


Рис. 2.6. Кусочно-линейная аппроксимация

Выбирать узлы имеет смысл только в интервале входных значений датчика, представляющем практический интерес (о критериях выбора см. следующую главу), таким образом, на рис. 2.6 участок кривой от 0 до s_0 опущен как находящийся за пределами практически необходимого диапазона.

Величину ошибки при кусочной аппроксимации можно определить как максимальное отклонение δ от реальной кривой до аппроксимирующей ее прямой. Существуют разные определения максимального отклонения (среднеквадратичное, абсолютный максимум, среднее и т.д.), но независимо от названия чем

больше величина δ , тем больше требуется выборков, что приводит к увеличению числа интервалов для того, чтобы величина отклонения была приемлемо малой. Другими словами, увеличение числа узлов уменьшает ошибку. Узлы не должны распределяться равномерно. Они могут располагаться ближе друг к другу на участках кривой, где нелинейность выше, и дальше друг от друга, где нелинейность меньше.

При использовании этого метода сигнальный процессор должен хранить координаты узла в памяти. Для компьютерной обработки сигналов внешнего воздействия s должна применяться линейная интерполяция (см. разд. 2.4.2).

2.1.7. Интерполяция с помощью сплайн-функции

Аппроксимация полиномами высоких порядков (третьего и выше) имеет ряд недостатков. Выбранные точки на одной части кривой сильно влияют на удаленные от них части этой же кривой. Этот недостаток отсутствует в аппроксимации с помощью сплайн-функции. Аналогично кусочно-линейной интерполяции сплайн-метод используется при интерполяциях полиномом третьего порядка между выбранными экспериментальными точками, называемыми узлами [1]. Это кривые между двумя соседними узлами, которые впоследствии «сшиваются» или «склеиваются» воедино для образования гладкой комбинированной аппроксимационной кривой. В этом случае нет необходимости использовать кривую третьего порядка, можно применить линейную интерполяцию. Линейная интерполяция (первого порядка) – простейший вид интерполяции, эквивалентный кусочно-линейной аппроксимации, описанной выше.

При сплайн-интерполяции можно пользоваться полиномами разных степеней, наиболее часто употребляемый из которых – полином третьей степени. Кривизна линии в каждой точке определяется второй производной. Она должна быть вычислена для каждого узла. Если вторая производная равна нулю, кубический сплайн называется «естественным» и применяется в большинстве случаев интерполяции. Интерполяция с помощью сплайн-функции является эффективным методом, при котором сохраняется гладкость функции передачи. Однако простоту использования и затраты на вычисления нужно принимать во внимание в жестко контролируемой микропроцессорной среде.

2.1.8. Многомерные функции передачи

Функция передачи датчика может определяться более чем одной входной переменной. В этом случае выход датчика может быть функцией многих переменных входного воздействия. Одним из примеров такого датчика может быть датчик влажности, выход которого зависит от двух переменных – относительной влажности и температуры. Другой пример – функция передачи датчика теплового (инфракрасного) излучения. Это функция¹ двух аргументов (две температуры): T_b , абсолютная температура объекта измерений, и T_s , абсолютная температура чувствительного элемента датчика. Следовательно, выходное напряжение датчика V пропорционально разности парабол четвертого порядка:

¹ Приведенная функция демонстрирует закон Стефана – Больцмана (разд. 4.12.3).

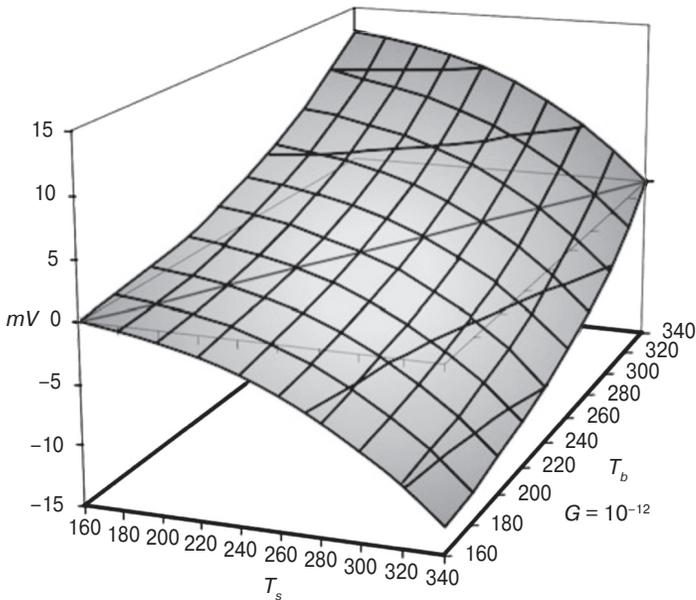


Рис. 2.7. Двумерная функция передачи датчика теплового излучения. Температура указана в градусах Кельвина

$$V = G(T_b^4 - T_s^4), \quad (2.18)$$

где G – константа. Ясно, что связь между температурой объекта T_b и выходным напряжением V не только нелинейно, но и нелинейным образом зависит от температуры поверхности чувствительного элемента датчика T_s , которая может быть измерена отдельным контактным датчиком температуры. Двумерная функция передачи уравнения (2.18) показана графически на рис. 2.7.

2.2. Калибровка

Если допуски датчика и схемы его подключения (обработки сигнала) превышают требуемую общую точность измерений, то калибровка датчика, или, точнее, комбинации датчика и его интерфейса подключения, необходима для уменьшения величины ошибки. Другими словами, калибровка требуется в каждом случае, когда необходимо получить высокую точность, используя датчик с меньшей точностью измерений. Например, если необходимо измерить температуру с точностью, предположим, $0,1^\circ\text{C}$, в то время как доступный для измерений датчик имеет точность измерений 1°C , это не означает, что данный датчик нельзя использовать. Для такого датчика должна применяться калибровка. Это означает, что должна быть определена собственная функция передачи данного датчика. Этот процесс называется *калибровкой*.

Калибровка требует несколько точно известных внешних воздействий и чтения соответствующих ответов датчика на них. Их также называют калибровочными точками, для которых величины ввода-вывода являются координатами точек. В некоторых удачных случаях необходима только одна пара таких точек, но, как правило, 2–5 пар

калибровочных точек используются для характеристики функции передачи в целях получения высокой точности измерений. После того как собственная функция передачи получена, любая точка между калибровочными точками может быть определена.

Для того чтобы получить калибровочные точки, необходим эталонный источник внешнего воздействия. Эталонный источник должен храниться в должных условиях и периодически подвергаться проверке на соответствие требованиям, предъявляемым к таким источникам, желательно в соответствии с национальными стандартами, как, например, стандарт NIST¹ в США. Нужно четко понимать, что точность калибровки напрямую связана с рассматриваемым датчиком как частью измерительного оборудования. Величина погрешности рассматриваемого датчика должна быть включена в величину общей погрешности, как будет показано в разд. 3.21.

Перед калибровкой должна быть известна математическая модель функции передачи или точная аппроксимация реакции датчика во всем рабочем интервале измерений. В большинстве случаев такие функции гладкие и монотонные. Очень редко они содержат сингулярности, и если это так, то такие сингулярности – полезные явления, применяющиеся для детектирования (например детектор ионных частиц).

Калибровка датчика может быть выполнена во многих возможных случаях, некоторые из которых описаны ниже.

1. Изменение функции передачи или ее аппроксимация для соответствия экспериментальным данным. Это включает в себя расчеты коэффициентов (параметров) выбранного уравнения функции передачи. После нахождения параметров функция передачи становится собственной для данного датчика. Она может быть использована для вычислений входного воздействия для любой реакции датчика в пределах диапазона его использования. Каждый калиброванный датчик обладает набором собственных параметров. Датчик остается неизменным.
2. Настройка системы получения данных для «обрезания» (модификации) ее выходных сигналов путем подстройки выходного сигнала в нормализованную «идеальную» функцию передачи. Примером могут служить масштабирование и сдвиг получаемых данных (модификация получения системой данных и смещение). Датчик остается неизменным.
3. Модификация (обрезка) свойств датчика для подгонки предустановленной функции передачи, датчик заменяется другим.
4. Создание специфического эталонного устройства с совпадающими характеристиками в некоторых калибровочных точках. Этот уникальный эталон используется системой сбора данных для компенсации погрешности датчика. Датчик остается неизменным.

В качестве примера рассмотрим рис. 2.8. На нем продемонстрированы три метода калибровки термистора (датчика температуры). На рис. 2.8а изображен термистор, погруженный в жидкостный термостат с точно регулируемой температурой. Температура жидкости постоянно измеряется прецизионным эталонным термометром. Для предотвращения замыкания контактов термистора жидкость должна быть диэлектрической, например минеральное масло или Fluorinert™.

¹ NIST – Национальный институт стандартов и технологий, www.nist.gov.

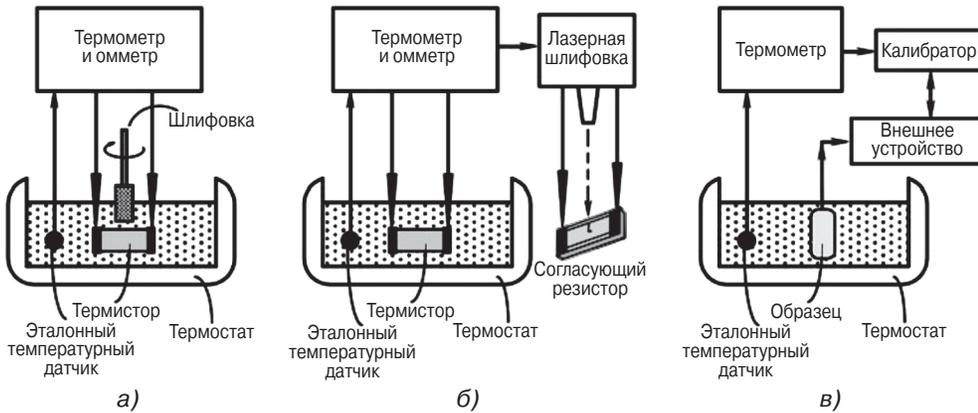


Рис. 2.8. Калибровка термистора: шлифовка (а), подстройка эталонного резистора (б) и определение калибровочных точек для построения функции передачи (в)

Сопротивление термистора измеряется прецизионным омметром. Миниатюрный шлифовальный ввод механически удаляет некоторое количество вещества тела датчика для изменения его размеров. Уменьшение размеров приводит к увеличению электрического сопротивления при данной температуре термостата. Когда сопротивление термистора совпадет с предустановленным значением «идеального» сопротивления, шлифование прекратится и калибровка будет считаться выполненной. Отклик термистора станет близким к идеальной кривой функции передачи, по крайней мере при данной температуре. В действительности одноточечная калибровка предполагает, что функция передачи может быть окончательно охарактеризована в данной точке.

Другой способ калибровки термистора показан на рис. 2.8б, в котором не модифицируют термистор, а проводят измерения при выбранной эталонной температуре. В результате измерений получают число, которое используют для выбора обычного (термостабильного) согласующего резистора как уникального эталонного образца. Этот резистор предназначается для использования в интерфейсе схемы масштабирования. Точное значение величины эталонного резистора достигается либо лазерной обрезкой, либо подбором подходящего из имеющихся в наличии. Такая уникальная пара совпадения термистор – резистор используется в измерительной схеме, например в мосте Уитстона. Поскольку это совпадающая пара термистор – резистор, реакция моста будет соответствовать «идеальной» функции передачи термистора.

В приведенных примерах методы (а) и (б) полезны при калибровке только при заданной температуре в предположении, что другие параметры функции передачи не нуждаются в калибровке. Если это не так, необходимы несколько калибровочных точек при различных температурах и сопротивлениях, как показано на рис. 2.8в. В этом случае в термостате последовательно устанавливают ряд температур и измеряют соответствующие им значения сопротивления терморезистора, которые используют для калибровки устройства, генерирующего соответствующие параметры для обратной функции передачи, которые должны сохраняться в устройстве, подключенном к термистору, т.е. термометру.

2.3. Расчет параметров

Если функция передачи линейна, как показано на рис. 2.2, в результате калибровки должны быть определены константы A и B . Если она экспоненциальна, то, как показано на рис. 2.7, должны быть определены константы A и k , и так далее.

Для вычисления параметров (констант) линейной функции передачи необходимы две точки данных, определенных с помощью двух калиброванных пар ввода-вывода. Рассмотрим простую линейную функцию передачи с помощью уравнения (2.3). Поскольку для определения прямой необходимы две точки, следует произвести калибровку в двух точках. Например, если в качестве датчика температуры используется полупроводниковый р-п-переход со смещением в прямом направлении (рис. 2.9а) (см. разд. 17.6), то его функция передачи будет линейной (рис. 2.9б), где температура t будет играть роль внешнего воздействия, а счетчик n АЦП из схемы интерфейса – вывода:

$$n = n_1 + B(t - t_1). \quad (2.19)$$

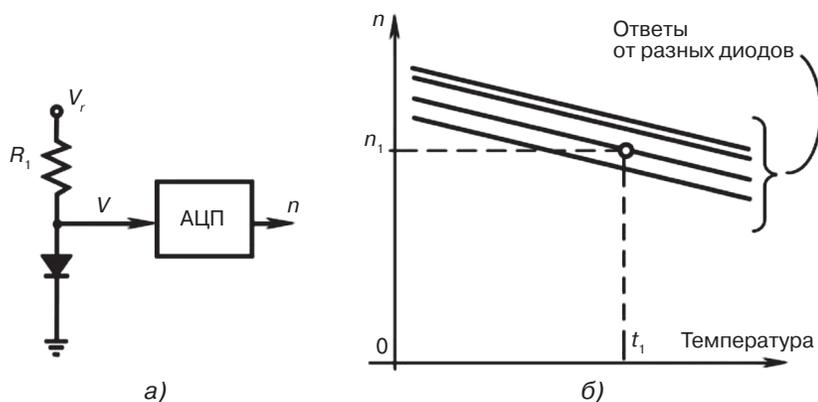


Рис. 2.9. Датчик температуры р-п-перехода (а) и функции передачи для нескольких датчиков (б). Каждый диод выдает разные n_1 при одинаковой температуре t_1

Отметим, что t_1 и n_1 являются координатами первой точки калибровки. Для полного определения линии датчик должен быть подвергнут измерениям при двух калибровочных температурах (t_1 и t_2), для которых должны быть измерены два соответствующих значения счетчика n . При первой калибровочной температуре t_1 значение счетчика n_1 .

После этого температура датчика доводится до второй калибровочной t_2 и измеряются его показания для второй калибровочной точки. В результате получим

$$n_2 = n_1 + B(t_2 - t_1), \quad (2.20)$$

из чего можно найти чувствительность с помощью соотношения

$$B = \frac{n_2 - n_1}{t_2 - t_1}, \quad (2.21)$$

а уравнение (2.19) превращается в линейную функцию передачи с тремя известными параметрами: B , n_1 и t_1 . Чувствительность (наклон) B выражена в единицах отсчет/градус. В примере на рис. 2.9 наклон B отрицательный, поскольку р-п-переход имеет отрицательный температурный коэффициент (ОТК). Следует отметить, что параметры, полученные с помощью калибровки, являются уникальными для эталонного датчика и должны быть сохранены в измерительной системе, к которой подключен датчик. Для другого аналогичного датчика эти параметры будут другими (возможно, за исключением t_1 , если все датчики калибровались при одинаковой температуре). После завершения калибровки любая температура в рабочем диапазоне может быть вычислена на основании данных выходного счетчика n АЦП при помощи обратной функции передачи

$$t = t_1 + \frac{n - n_1}{B}. \quad (2.22)$$

В некоторых удачных случаях параметр B может быть известен с достаточной точностью, так что вычисление параметра B не нужно. Для р-п-перехода на рис. 2.9а наклон B обычно достаточно одинаков для партии или типа полупроводниковой пластины, следовательно, его можно рассматривать как известный параметр для всех диодов промышленной партии. Однако все диоды могут обладать различными величинами смещения, поэтому одноточечная калибровка все же необходима для определения n_1 каждого датчика в отдельности при температуре калибровки t_1 .

Для нелинейных функций передачи калибровка в одной точке может быть существенна только в некоторых, достаточно редких случаях, когда все остальные параметры известны, но часто требуются даже две и более калиброванные пары ввода-вывода. В случаях полиномиальных функций передачи второго или третьего порядка требуются соответственно три или четыре калиброванные пары. Для полинома третьего порядка

$$E = b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0, \quad (2.23)$$

для нахождения четырех параметров $b_0 \dots b_3$ необходимы четыре экспериментальные калибровочные пары ввода-вывода (калибровочные точки): s_1 и E_1 , s_2 и E_2 , s_3 и E_3 , s_4 и E_4 .

Подставляя данные экспериментальных пар в уравнение (2.23), получим систему четырех уравнений:

$$\begin{aligned} E_1 &= b_3 s_1^3 + b_2 s_{12} + b_1 s_1 + b_0; \\ E_2 &= b_3 s_{23} + b_2 s_{22} + b_1 s_2 + b_0; \\ E_3 &= b_3 s_{33} + b_2 s_{32} + b_1 s_3 + b_0; \\ E_4 &= b_3 s_{43} + b_2 s_{42} + b_1 s_4 + b_0. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Для решения системы уравнений (2.24) найдем детерминанты системы:

$$\begin{aligned}
\Delta &= \left(\frac{s_1^2 - s_2^2}{s_1 - s_2} - \frac{s_1^3 - s_4^3}{s_1 - s_4} \right) \left(\frac{s_1^3 - s_2^3}{s_1 - s_2} - \frac{s_1^3 - s_3^3}{s_1 - s_3} \right) - \left(\frac{s_1^2 - s_2^2}{s_1 - s_2} - \frac{s_1^2 - s_3^2}{s_1 - s_3} \right) \left(\frac{s_1^3 - s_2^3}{s_1 - s_2} - \frac{s_1^3 - s_4^3}{s_1 - s_4} \right); \\
\Delta_a &= \left(\frac{s_1^2 - s_2^2}{s_1 - s_2} - \frac{s_1^2 - s_4^2}{s_1 - s_4} \right) \left(\frac{E_1 - E_2}{s_1 - s_2} - \frac{E_1 - E_3}{s_1 - s_3} \right) - \left(\frac{s_1^2 - s_2^2}{s_1 - s_2} - \frac{s_1^2 - s_3^2}{s_1 - s_3} \right) \left(\frac{E_1 - E_2}{s_1 - s_2} - \frac{E_1 - E_4}{s_1 - s_4} \right); \\
\Delta_b &= \left(\frac{s_1^3 - s_2^3}{s_1 - s_2} - \frac{s_1^3 - s_3^3}{s_1 - s_3} \right) \left(\frac{E_1 - E_2}{s_1 - s_2} - \frac{E_1 - E_4}{s_1 - s_4} \right) - \left(\frac{s_1^3 - s_2^3}{s_1 - s_2} - \frac{s_1^3 - s_4^3}{s_1 - s_4} \right) \left(\frac{E_1 - E_2}{s_1 - s_2} - \frac{E_1 - E_3}{s_1 - s_3} \right),
\end{aligned} \tag{2.25}$$

из которых полиномиальные коэффициенты вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned}
b_3 &= \frac{\Delta_a}{\Delta}; \\
b_2 &= \frac{\Delta_b}{\Delta}; \\
b_1 &= \frac{1}{s_1 - s_4} \left[E_1 - E_4 - b_3(s_1^3 - s_4^3) - b_2(s_1^2 - s_4^2) \right]; \\
b_0 &= E_1 - b_3 s_1^3 - b_2 s_1^2 - b_1 s_1.
\end{aligned} \tag{2.26}$$

В случае когда детерминант Δ мал, неточность окажется весьма значительной. Следовательно, точки калибровки должны быть расставлены в рабочем диапазоне так широко, насколько это возможно.

Когда изменения температуры достаточно инертны, калибровка может оказаться очень медленным процессом. Для уменьшения затрат на производство важно экономить время и, следовательно, минимизировать количество точек калибровки. Таким образом, следует выбирать наиболее выгодную с точки зрения затрат функцию передачи или аппроксимацию. Экономические соображения требуют наименьшего количества точек калибровки. Например, если приемлемая точность может быть получена полиномом второго порядка, не стоит использовать полином третьего порядка.

2.4. Расчет внешнего воздействия

Главной целью детектирования является определение величины входного воздействия s по измеряемой величине выходного сигнала E . Это достигается при помощи двух методов:

- 1) из обратной функции передачи $s = F(E)$, которая может быть аналитической или полученной в результате аппроксимации, или
- 2) из прямой функции передачи $E = f(s)$ путем итерационных вычислений.

2.4.1. Использование аналитического уравнения

Когда аналитическое уравнение функции передачи известно, используется прямой подход к вычислениям. В этом случае измеряют выходной сигнал E , подставляют его в формулу и производят вычисления значения величины входного воздействия s .

Например, для вычисления смещения от величины сопротивления потенциометра используется уравнение (2.4). Для других функциональных моделей используются соответственно уравнения (2.4), (2.6), (2.8) и (2.10).

2.4.2. Использование кусочно-линейной аппроксимации

В разд. 2.1.6 описывается понятие аппроксимации. Для вычисления внешнего воздействия s самым первым шагом является нахождение его расположения, другими словами, между какими точками находился выходной сигнал E . Следующий шаг состоит в использовании метода *линейной интерполяции* для вычисления входного воздействия s .

Покажем, как это работает.

Во-первых, определение нахождения выхода — где он находится, между какими точками. Например, было обнаружено, что выход находится где-то между точками p_1 и p_4 , как показано на рис. 2.10. Выход датчика $E = n$ определяется из счетчика АЦП. Образуется большой треугольник, в углах которого находятся точки p_1 , p_2 и p_3 . Неизвестное значение внешнего воздействия s_x соответствует измеренному счетчиком АЦП значением n_x . На рисунке эта точка обозначена как p_5 на аппроксимирующей прямой, формируя маленький треугольник с вершинами в точках p_1 , p_2 и p_5 . Оба треугольника подобны, что позволяет получить линейное уравнение для вычисления неизвестного внешнего воздействия s_x из известной величины n_x :

$$s_x = s_i + \frac{n_x - n_i}{n_{i+1} - n_i} (s_{i+1} - s_i). \quad (2.27)$$

Алгоритм решения этого уравнения легко запрограммировать и решить при помощи дешевого микропроцессора, который сохранит в памяти справочную таблицу, содержащую узловые координаты (табл. 2.1).

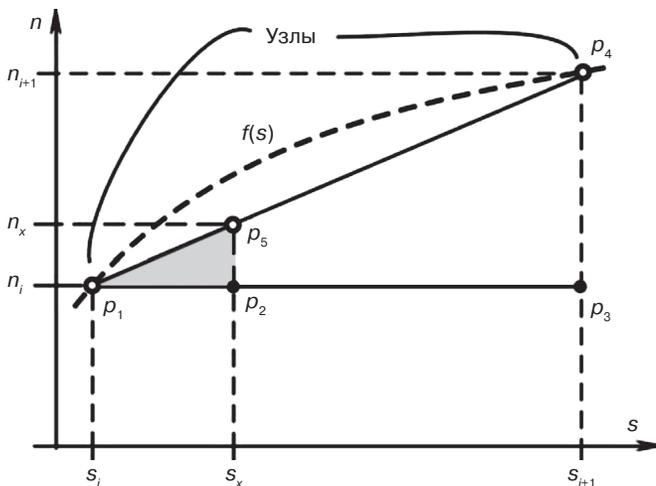


Рис. 2.10. Вычисление внешнего воздействия методом кусочно-линейной аппроксимации

Таблица 2.1. Справочная таблица узлов для вычисления значений на входе из измеренных значений на выходе

Узел	0	1	2	...	<i>i</i>	...	<i>k</i>
Выход	n_0	n_1	n_2	...	n_i	...	n_k
Вход	s_0	s_1	s_2	...	s_i	...	s_k

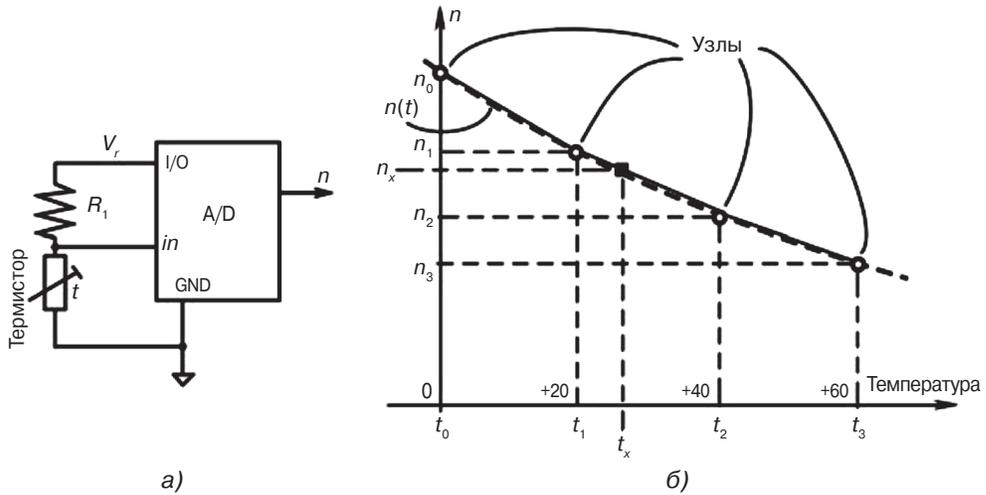


Рис. 2.11. Цепь термистора (а) и его линейно-кусочная аппроксимация (б) с использованием четырех узлов

В качестве иллюстрации сравним использование полной функциональной модели функции передачи и кусочно-линейной аппроксимации. Очевидно, что полная функциональная модель дает более точный результат вычислений. На рис. 2.11а показана температура термистора с нагрузочным резистором R_1 , подсоединенным к 12-битному аналого-цифровому преобразователю (полная шкала $N_0 = 4095$ отсчетов, соответствующих эталонному напряжению V_r). Термистор используется для измерения температуры в полном диапазоне ввода от 0 до +60 °С.

Выходной счетчик термистора измерительной цепи можно моделировать нелинейной функцией от температуры:

$$n_x = N_0 \frac{R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}{R_1 + R_r e^{\beta(T_x^{-1} - T_r^{-1})}}, \tag{2.28}$$

где T_x – измеряемая температура, T_r – эталонная температура, R_r – сопротивление термистора при эталонной температуре T_r , β – характеристическая температура. Все температуры и β выражены в градусах Кельвина.

После преобразования уравнения (2.28) получим обратную функцию передачи, позволяющую вычислить входную температуру в Кельвинах:

$$T_x = \left[\frac{1}{T_r} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{n_x R_1}{N_0 - n_x R_r} \right) \right]^{-1}. \tag{2.29}$$

Приведенные выше уравнения (2.28) и (2.29) содержат два неизвестных параметра – R_r и β . Следовательно, перед тем как двигаться дальше, внутренняя цепь, включая АЦП, должна быть откалибрована при температуре T_r и при некоторой температуре T_c . В цепи используется нагрузочный резистор $R_1 = 100$ кОм. Для калибровки выберем две калибровочные температуры в рабочем диапазоне $T_r = 293,15$ К и $T_c = 313,15$ К, соответствующие 20 и 40 °С соответственно.

Во время калибровки термистор последовательно погружается в термостат при двух температурах, а величины счетчика АЦП регистрируются как

$$n_r = 1863 \text{ при } T_r = 293,15 \text{ К};$$

$$n_c = 1078 \text{ при } T_c = 313,15 \text{ К}.$$

Подставляя эти пары в уравнение (2.28) и решая систему двух уравнений, получим величины параметров $R_r = 8,350$ кОм и $\beta = 3895$ К. Процесс калибровки завершен.

Теперь, когда все параметры уравнений (2.28) и (2.29) полностью известны, уравнение (2.29) может быть использовано для расчета температуры от любого счетчика АЦП в рабочем диапазоне. Можно сделать вывод о том, что это наиболее правильный путь для измерения истинной температуры. Теперь посмотрим, что получается в случае применения кусочно-линейной аппроксимации.

Разделим функцию передачи в уравнении (2.28) на три части (рис. 2.11б) так, чтобы на концах участков оказались точки (узлы), соответствующие температурам 0 и 60 °С, и две равноудаленные точки в центре, соответствующие температурам 20 и 40 °С. Будем использовать линейную аппроксимацию между соседними точками¹: $t_0 = 0$ °С, $t_1 = t_2 = 20$ °С, $t_2 = 40$ °С и $t_3 = 60$ °С.

Используя калибровку, получим выходы АЦП при данных температурах:

$$n_0 = 2819 \text{ при } t_0 = 0 \text{ °С};$$

$$n_1 = n_r = 1863 \text{ при } t_1 = t_r = 20 \text{ °С};$$

$$n_2 = 1078 \text{ при } t_2 = 40 \text{ °С};$$

$$n_3 = 593 \text{ при } t_3 = 60 \text{ °С}.$$

Пары с координатами отсчет – температура сведены в справочной табл. 2.2.

Таблица 2.2. Справочная таблица для вычисления температур

Узел	0	1	2	3
Отсчет	2819	1863	1078	593
Температура, °С	0	20	40	60

¹ Отметим, что эталонная температура выражена в градусах Цельсия, $t_r = t_1 = T_r - 273,15$, где T_r выражена в градусах Кельвина.

В качестве примера сравним температуры, вычисленные из функциональной модели уравнения (2.29) и табл. 2.2, принимая во внимание, что неизвестная температура соответствует показанию счетчика АЦП $n_x = 1505$. Нужно найти эту температуру. Из табл. 2.2 можно определить, что величина, измеренная счетчиком n_x , расположена где-то между точками 1 и 2. Чтобы найти температуру t_x , измеренные отсчеты счетчика и величины узлов нужно подставить в формулу (2.27), чтобы получить

$$t_x = t_1 + \frac{n_x - n_1}{n_2 - n_1}(t_2 - t_1) = 20 + \frac{1505 - 1863}{1078 - 1863}(40 - 20) = 29,12 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.30)$$

Для сравнения двух методов вычислений используем реальную функцию передачи уравнения (2.29), подставляя в нее то же значение $n_x = 1505$. В результате вычислений получим температуру внешнего воздействия $t_x = 28,22 \text{ } ^\circ\text{C}$. Это число меньше полученного из уравнения (2.30). Следовательно, кусочно-линейная аппроксимация с использованием только двух центральных узлов завышает температуру на $0,90 \text{ } ^\circ\text{C}$, что может быть слишком большой величиной для ошибки. Для более детального исследования необходимо уменьшить ошибки и использовать более двух центральных узлов.

2.4.3. Итерационные вычисления внешнего воздействия (метод Ньютона)

Если *обратная* функция передачи неизвестна, метод итераций позволяет использовать *прямую* функцию передачи для вычисления входного воздействия. Мощным итерационным методом расчета является метод Ньютона¹ [1–3]. Он основан, во-первых, на предположении, что начальная величина внешнего воздействия $s = s_0$ и последующем применении алгоритма Ньютона для вычисления последовательности новых величин s , которые являются сходящимися. Следовательно, алгоритм включает в себя несколько шагов вычислений, каждый из которых приближает нас ближе и ближе к искомой величине. Когда разность между двумя последовательными вычисленными значениями величины s становится существенно малой (меньше, чем приемлемая ошибка), алгоритм останавливается и последнее вычисленное значение s считается решением оригинального уравнения, следовательно, величина неизвестного внешнего воздействия считается найденной. Метод Ньютона работает достаточно быстро, особенно если исходное предположение достаточно близко к действительному значению s .

Выходной сигнал представляется с помощью функции передачи датчика $f(s)$ как $E = f(s)$, что можно переписать в виде $E - f(s) = 0$. Метод Ньютона предполагает вычисление *последовательности* величин внешнего воздействия для измеряемой выходной величины E :

$$s_{i+1} = s_i - \frac{f(s_i) - E}{f'(s_i)}. \quad (2.31)$$

¹ Этот метод также известен как метод Ньютона – Рафсона, назван в честь Исаака Ньютона и Джозефа Рафсона.

Эта последовательность после нескольких шагов сходится к искомой величине s . Здесь $s_{i=1}$ – вычисленная величина внешнего воздействия на этапе итерации $i + 1$, где s_i – вычисляемая величина на предыдущем этапе итерации i и $f'(s_i)$ – первая производная функции передачи при входном значении s_i . Индекс итерации $i = 0, 1, 2, 3, \dots$. Обращаем внимание, что во всех итерациях используется одна и та же величина E .

Начиная с предположения о величине s_0 , используют уравнение (2.31) для вычисления следующей аппроксимации для истинного значения внешнего воздействия s . Затем операция повторяется с использованием величины, полученной в предыдущей аппроксимации величины s . Другими словами, вычисление последовательности s_i выполняется несколько раз (итераций) до тех пор, пока приращение s_i не станет существенно малым, желательно в диапазоне чувствительности датчика.

Для иллюстрации использования метода Ньютона предположим, что прямая функция передачи является полиномом третьего порядка

$$f(s) = as^3 + bs^2 + cs + d, \quad (2.32)$$

с коэффициентами $a = 1,5$, $b = 5$, $c = 25$, $d = 1$. Затем на следующем шаге подставляем уравнение (2.32) в (2.31), чтобы выйти на итерацию $s_{i=1}$:

$$s_{i+1} = s_i - \frac{as_i^3 + bs_i^2 + cs_i + d - E}{3as_i^2 + 2bs_i + c} = \frac{2as_i^3 + bs_i^2 - d + E}{3as_i^2 + 2bs_i + c}. \quad (2.33)$$

Эта формула используется для всех последующих итераций. Предположим, например, что измеренное значение ответа датчика $E = 22,000$ и в нашем предположении истинная величина внешнего воздействия $s_0 = 2$. Тогда уравнение (2.33) преобразуется в следующую итерационную последовательность вычислений внешнего воздействия s_{i+1} :

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 2^3 + 5 \cdot 2^2 - 1 + 22}{3 \cdot 1,5 \cdot 2^2 + 2 \cdot 5 \cdot 2 + 25} = 1,032; \\ s_2 &= \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 1,032^3 + 5 \cdot 1,032^2 - 1 + 22}{3 \cdot 1,5 \cdot 1,032^2 + 2 \cdot 5 \cdot 1,032 + 25} = 0,738; \\ s_3 &= \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 0,738^3 + 5 \cdot 0,738^2 - 1 + 22}{3 \cdot 1,5 \cdot 0,738^2 + 2 \cdot 5 \cdot 0,738 + 25} = 0,716; \\ s_4 &= \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 0,716^3 + 5 \cdot 0,716^2 - 1 + 22}{3 \cdot 1,5 \cdot 0,716^2 + 2 \cdot 5 \cdot 0,716 + 25} = 0,716. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Видно, что после третьей итерации последовательность s_i сходится к $0,716$.

Следовательно, на шаге 4 алгоритм Ньютона останавливается и величине внешнего воздействия присваивается значение $s = 0,716$. Для проверки точности решения подставим s в уравнение (2.32) и получим $f(s) = E = 22,014$, что в пределах $0,06\%$ совпадает с вычисленным значением ответа датчика $E = 22,000$.

Обращаем внимание, что результаты вычисления методом Ньютона приводят к большим ошибкам, когда чувствительность датчика уменьшается. Другими словами, метод дает сбой, когда функция сглаживается (первая производная приближается к нулю). В таких случаях может применяться так называемый модифицированный метод Ньютона. В других ситуациях, когда первая производная не может быть легко вычислена аналитически, используется величина чувствительности, полученная из Δs и ΔE , как в (2.17).

Литература

1. Stoer, J., & Bulirsch, R. (1991). Introduction to numerical analysis (2nd ed., pp. 93–106). New York, NY: Springer.
2. Kelley, C. T. (2003). Solving nonlinear equations with Newton's method. Number 1 in Fundamental algorithms for numerical calculations. Philadelphia, PA: SIAM.
3. Suli, E., & Mayers, D. (2003). An introduction to numerical analysis. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

ГЛАВА 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

О, на что только люди не отваживаются!
Что только они могут сделать!
А что люди делают ежедневно, не осознавая,
что они творят!

В. Шекспир. Много шума из ничего

При выборе датчика в первую очередь следует обозначить требования к нему для использования в конкретном практическом применении. Когда они определены, следует определить доступность датчика. Определение начинается с изучения паспортных данных, в которых описаны все характеристики датчика. Задача состоит в том, чтобы убедиться в соответствии всех параметров датчика требованиям того практического применения, в котором он должен использоваться. Попытка использовать наилучший датчик из имеющихся заманчива, однако выбор наиболее дорогого варианта не относится к хорошей инженерной практике. В этой главе содержится обзор наиболее типичных и часто встречающихся характеристик и требований к датчикам, содержащихся в паспортных данных, или хотя бы тех, которые должны в них присутствовать.

3.1. Датчики для устройств мобильной связи

За последнее десятилетие возник крупный рынок устройств мобильной связи (УМС), таких как смартфоны, умные часы и планшеты, требующий большого разнообразия датчиков. В настоящее время УМС превратились в бионические продолжения нас самих. Телефон теперь предназначен не только для передачи звука на большие расстояния, он превратился в персонального киберпомощника для выполнения множества задач. Для обеспечения работы ряда полезных функций УМС необходима информация извне от внешних или встроенных датчиков и детекторов в целях функционирования их операционной системы. Часть датчиков используется для интерфейса «пользователь – УМС», например для ввода команд (клавиатура, микрофон, акселерометр), другие датчики предназначены для взаимодействия с окружающей средой (свет, давление, химия, и т.д.). Сегодня обычные УМС содержат довольно большое количество датчиков, поддерживающих тысячи приложений, предназначенных для промышленности, науки, бытовых и медицинских целей. Такими встроенными датчиками являются:

фотокамера – позволяет делать фото и видео;

микрофон – улавливает звуки преимущественно в слышимом человеком диапазоне;

акселерометр – обнаруживает движение УМС и направление действия сил гравитации;

гироскоп – измеряет пространственное положение УМС;

магнетометр (компас) – чувствителен к напряженности и направленности магнитных полей;

GPS – радиоприемник и процессор для определения глобальных координат;

детектор приближения – обнаруживает близость УМС к телу человека.

Тем не менее указанные выше датчики воспринимают довольно ограниченное количество внешних воздействий и не могут поддерживать многие новые приложения современных УМС. Новые области применения включают:

промышленное – для определения бесконтактным способом температуры, тепловидения, влажности, потоков воздуха, ионизирующего излучения, задымленности, диэлектрической постоянной объектов, химического состава, расстояния (дистанции), атмосферного давления, свежести продуктов и т.д.;

медицинское – для определения внешней и внутренней (кожной) температур, тепловидения, артериального давления крови, ЭКГ, факторов крови (уровни глюкозы, холестерина, сатурации гемоглобина кислородом), глубокой визуализации тела человека, запаха (электронный нос), изменений в поведении и т.д.;

военное – ночное видение, обнаружение ядовитых газов, приближения, ионизирующего излучения, взрывчатых веществ, химических или биологических агентов и т.д.;

бытовое – измерение температуры тела, пульса, радона, определение беременности, наличия алкоголя и сероводорода, состава пищи, изменений поведения, приближения, уровня УФ, электромагнитного загрязнения, поверхностной температуры и т.д.

3.1.1. Требования к УМС-датчикам

Поскольку УМС-датчики предназначены для встраивания в маленькие, накладные устройства, они требуют особого подхода при разработке. Возможно, наиболее важной особенностью УМС-датчика является полная интеграция с сопутствующими компонентами, включая, помимо прочего, формирование сигнала, обработку данных, и схемами связи. Основная идея состоит в том, что УМС-датчик должен быть больше, чем датчик: он должен быть интегрирован как самостоятельный чувствительный модуль – миниатюрный инструмент, обнаруживающий, сохраняющий, оцифровывающий, обрабатывающий, выдающий и передающий информацию. Важными требованиями к чувствительным модулям УМС являются низкое потребление энергии, малые вес и размер, высокая точность, стабильность, малое время отклика и множество других. В табл. 3.1 приведены важнейшие требования к УМС-датчикам [1]. Для подчеркивания их важности назовем их «десятью заповедями» конструкции мобильного датчика. Все вместе и каждый в отдельности из них являются критическими и не должны игнорироваться. Даже если одна из «заповедей» нарушена, датчик не может быть полностью совместим с мобильными устройствами.

Таблица 3.1. «Десять заповедей» конструкции мобильных сенсоров

1	Интеллектуальный датчик: встроенный преобразователь сигнала и ЦОС
2	Встроенная сеть связи (I ² C, ББС, Bluetooth и т.д.)
3	Интегрированные сопутствующие компоненты (оптика, термостат и т.д.)
4	Высокая чувствительность к детектируемому сигналу (подавление интерференции)
5	Быстрый отклик
6	Миниатюрные размеры для размещения в мобильном устройстве
7	Низкое энергопотребление
8	Высокая стабильность в нестабильной среде
9	Долгосрочная стабильность без необходимости перекалибровки или замены
10	Низкая стоимость при существенных объемах производства

Существуют четыре возможных способа соединения чувствительного модуля и УМС. На рис. 3.1 показано, что чувствительный модуль может быть встроен непосредственно в корпус УМС (а), подключен к съемному защитному корпусу (чехол), который открывается в УМС (б), он может выступать как внешнее устройство для подключения к одному из портов УМС (в) или, наконец, как внешний модуль, подключающийся к УМС при помощи беспроводного интерфейса.

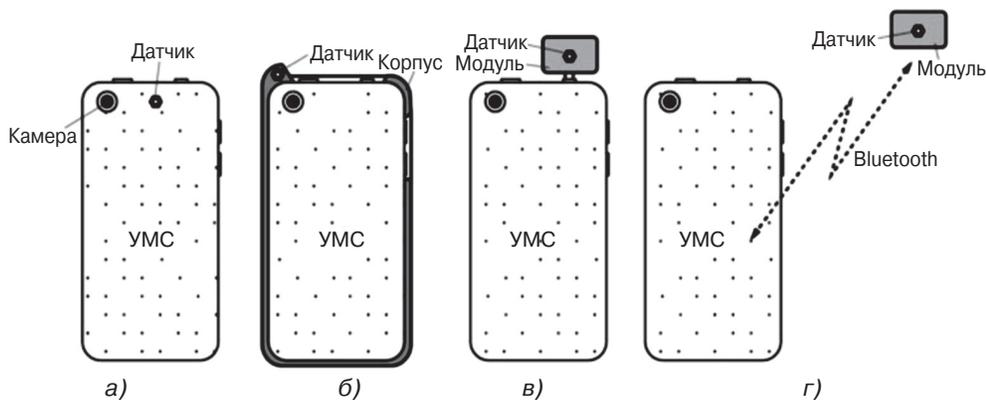


Рис. 3.1. Четыре возможных способа подключения чувствительного модуля к УМС

Все эти возможные решения работоспособны с инженерной точки зрения, однако с точки зрения удобства и практичности вариант (б) наиболее привлекателен для связи с универсальным потребительским УМС. Размещение датчиков внутри защитного корпуса позволяет скрыть их, не заботиться об их эргономичности и сделать доступными их в любой момент, когда это необходимо, без дополнительных действий со стороны оператора. Чувствительный «умный корпус» соединяется с УМС или проводниками, или преимущественно посредством беспроводной связи, например ББС¹ или Bluetooth.

¹ NFS означает near-field communication, «ближняя бесконтактная связь», ББС.

3.1.2. Интеграция

Интеграция различных функционалов в чувствительный модуль основана на том, что чувствительный элемент редко работает сам – необходимо множество поддерживающих компонентов, таких как заданные значения напряжения или тока, обработка сигналов, нагревателей, мультиплексоров, газоанализаторов, линз, цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) и многих других.

В качестве иллюстрации рассмотрим рис. 3.2, на котором показан чувствительный модуль с интегрированным бесконтактным инфракрасным термометром [2]. Этот модуль может быть встроен в корпус УМС (вариант *а*) или стать частью «умного» корпуса (вариант *б*).

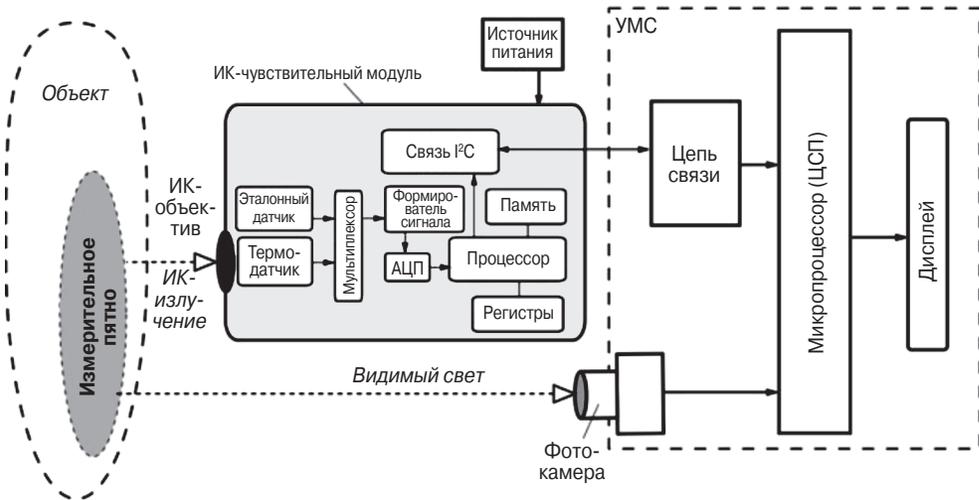


Рис. 3.2. Блок-схема детектирования теплового излучения (ИК-излучения) чувствительным модулем в УМС

ИК-фоточувствительный модуль функционирует совместно с внутренней фотокамерой УМС, которая выполняет функции видеоискателя для ИК-объектива. ИК-объектив и фотокамера фокусируются на области измерения (измерительном пятне). ИК-излучение, испускаемое обычно от поверхности пятна, фокусируется узко-угольным ИК-объективом на датчике теплового излучения, который представляет собой термопару либо микроболометр. Чувствительный элемент преобразует излучение в слабый электрический сигнал, который совместно с выходом эталонного датчика температуры мультиплексируется и подается в формирователь сигнала. Фильтры формирователя сигнала преобразуют наложенные напряжения и передают измеренные сигналы в подходящем для преобразования в цифровой формат виде в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) высокого разрешения. Оцифрованные сигналы обрабатываются цифровым сигнальным процессором (ЦСП) для расчета температуры объекта и затем пересылаются посредством последовательной цифровой связи I²C в УМС для отображения и интерпретации. Ясно, что этот чувствительный модуль представляет собой бесконтактный ИК-термометр, не требующий внешних компонентов для взаимодействия с УМС. Любой датчик,

предназначенный для УМС, должен соответствовать такому подходу – полная интеграция всех основных функций в одном небольшом корпусе.

3.2. Диапазон измеряемых значений (максимальный входной сигнал)

Динамический диапазон внешних воздействий, который датчик может воспринять, называется *диапазоном измеряемых значений* (FS). Эта величина показывает максимально возможное значение входного сигнала, которое датчик может преобразовать в электрический сигнал, не выходя за пределы допустимых погрешностей. Для датчиков с очень широкой и нелинейной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) динамический диапазон внешних воздействий часто выражается в децибелах, которые являются логарифмической мерой отношений либо мощности, либо напряжений. Всегда необходимо помнить, что децибелы выражают не абсолютные значения, а только отношения величин. Сигналы, отображенные в логарифмическом виде, имеют гораздо меньшие величины, чем исходные, что на практике в ряде случаев бывает очень удобно. Поскольку логарифмическая шкала является нелинейной, сигналы низкого уровня в ней представляются с большим разрешением, тогда как сигналы высокого уровня претерпевают большее сжатие. Другими словами, логарифмическая шкала для малых сигналов работает как микроскоп, а в случае больших сигналов – как телескоп. По определению, децибел равен десяти логарифмам отношения мощности двух сигналов (см. табл. 3.2), т.е.

$$1 \text{ дБ} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.1)$$

Исходя из этого можно утверждать, что децибел в двадцать раз превышает логарифмы отношений силы, тока и напряжений, т.е.

$$1 \text{ дБ} = 20 \log \frac{E_2}{E_1}. \quad (3.2)$$

Таблица 3.2. Отношения между мощностью, силой (напряжением, током) и децибелами

Отношение мощности	1,023	1,26	10,0	100	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ¹⁰
Отношение сил	1,012	1,12	3,16	10,0	31,6	100	316	10 ³	3162	10 ⁴	3×10 ⁴	10 ⁵
Децибелы	0,1	1,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0

3.3. Диапазон выходных значений

Диапазон выходных значений (FSO) – алгебраическая разность между электрическими выходными сигналами, измеренными при максимальном и минимальном внешнем воздействии. В случае цифрового выхода максимальное значение цифрового счетчика АЦП может быть вычислено для абсолютного максимума диапазона выходных значений. В эту величину должны входить все возможные отклонения от идеальной передаточной функции. На рис. 3.3а величина S_{FS} отображает диапазон выходных значений.

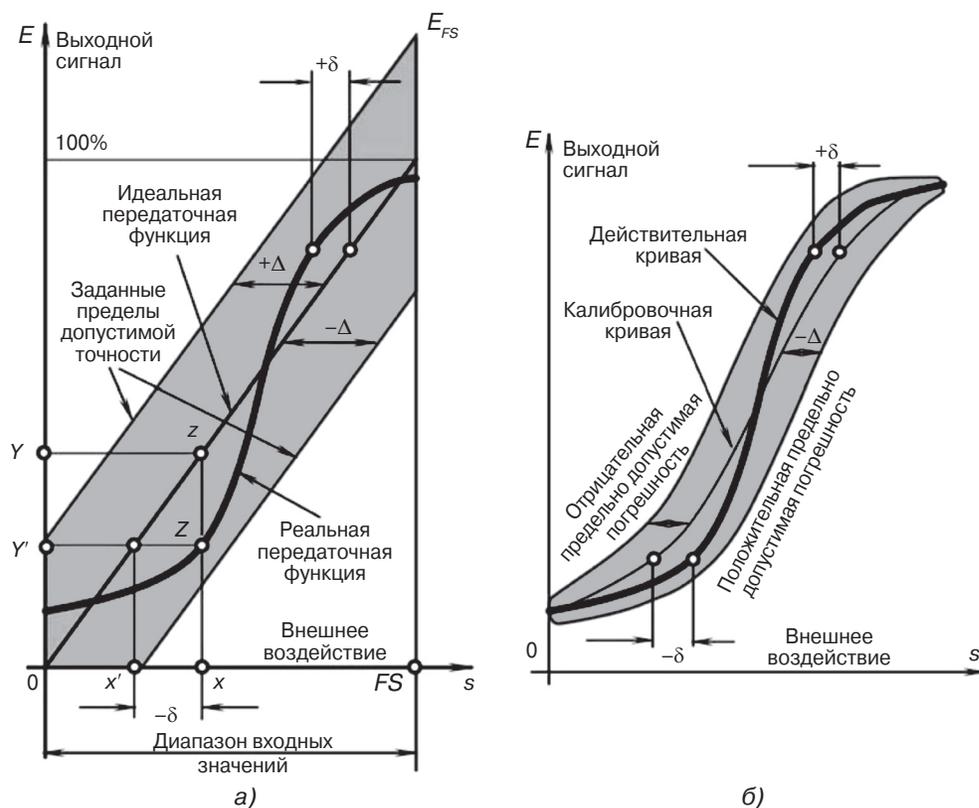


Рис. 3.3. Передаточная функция (а) и пределы допустимой погрешности (б). Погрешности определены относительно входных значений

3.4. Точность

Точность — очень важная характеристика любого датчика. Правда, когда говорят о точности датчика, чаще всего подразумевают его *неточность* или *погрешность измерений*. Под погрешностью измерений, как правило, понимают величину максимального расхождения между показаниями реального и идеального датчиков (см. ниже), поскольку никто не может быть абсолютно уверен в том, что представляет собой истинное значение величины. Считается, что измеренное значение соответствует реальному с определенной степенью достоверности (см. разд. 3.20).

Погрешность датчика от идеальной (истинной) функции передачи можно также представить в виде разности между значением, вычисленным по выходному сигналу датчика, и реальным значением поданного входного сигнала. Например, рассмотрим линейный датчик перемещений. В идеальном случае, если его чувствительность b равна 1 мВ/мм, при смещении объекта на 1 мм напряжение на выходе должно измениться на 1 мВ. Однако на практике при перемещении объекта на расстояние $s = 10$ мм выходное напряжение изменилось на 10,5 мВ, т.е. $S = 10,5$ мВ. Преобразовав это значение при помощи инверсной передаточной функции, получим, что при таком напряжении перемещение объекта должно быть равным $s_x = S/b = 10,5$ мм,

т.е. на 0,5 мм больше действительного. Вот эти 0,5 мм и являются погрешностью измерений. Следовательно, можно утверждать, что в пределах 10-миллиметрового диапазона абсолютная погрешность измерений данного датчика составляет 0,5 мм, а в относительных единицах она равна $(0,5 \text{ мм}/10 \text{ мм}) \times 100\% = 5\%$. Если в отсутствие случайных ошибок каждый раз при повторении этого эксперимента будет наблюдаться погрешность, равная 0,5 мм, говорят, что датчик в диапазоне 10 мм имеет *систематическую погрешность*, равную 0,5 мм. При большем смещении величина ошибки может быть выше. Но, как правило, случайные ошибки всегда присутствуют, поэтому на практике систематическая погрешность чаще всего представляется в виде среднего значения из множества экспериментальных значений.

На рис. 3.3а показана идеальная или теоретическая передаточная функция (тонкая линия). В реальной жизни любой датчик обладает теми или иными недостатками. Толстой линией на рисунке выделена одна из реальных передаточных функций, которые не обязательно являются линейными и монотонными. Реальная функция почти никогда не совпадает с идеальной. Даже когда датчики изготавливаются в идентичных условиях, из-за разницы в материалах, в мастерстве работников, из-за ошибок разработчиков, производственных допусков и т.п. их передаточные функции всегда будут отличаться друг от друга. Однако все они не должны выходить за пределы определенной зоны, лежащей в границах предельно допустимых погрешностей, которые находятся от линии идеальной передаточной функции на расстоянии $\pm\Delta$. Следовательно, разница между реальной и идеальной передаточной функцией δ всегда должна быть меньше или равна Δ .

Для примера рассмотрим ситуацию, когда входной сигнал датчика равен x (рис. 3.3а). В идеальном случае при этом выходной сигнал должен быть равен Y , что соответствует точке z на передаточной функции. Вместо этого по реальной функции при значении x мы попадем в точку Z и, следовательно, получим выходной сигнал, равный Y' , соответствующий точке z' на идеальной передаточной функции, которой, в свою очередь, должен соответствовать входной сигнал x' . Поскольку $x' < x$, погрешность измерений в данном случае будет равна $-\delta$. Когда мы рассчитываем величину внешнего воздействия Y' , мы не знаем, чем отличается реальная функция передачи от наблюдаемой «идеальной», так что мы можем использовать для расчетов идеальную обратную функцию передачи.

На точность датчиков влияют такие характеристики, как гистерезис, мертвая зона, параметры калибровки, повторяемость датчиков от партии к партии и воспроизводимость погрешностей, которые будут рассмотрены в следующих разделах. Предельно допустимые погрешности обычно соответствуют самым худшим рабочим характеристикам датчиков. Из рис. 3.3б видно, что при более корректном проведении калибровки (например при проведении калибровки на большем количестве точек) калибровочная кривая проходит ближе к реальным передаточным функциям, что означает повышение точности измерений для каждого отдельного датчика, и подгонка кривой осуществляется так, как описывалось выше. На практике пределы допустимых погрешностей устанавливаются не вокруг идеальной передаточной функции, а относительно калибровочной кривой. Допустимые пределы становятся меньше, если они не включают в себя погрешности, связанные с различиями датчиков от партии к партии, а также когда они относятся только к одному специ-

ально откалиброванному датчику. Все это повышает точность измерений, однако значительно повышает стоимость, из-за чего во многих ситуациях эти методы не могут быть применены. Часто неточность (точность) определяется как максимум, или стандартная, или средняя ошибка.

Погрешность датчиков может быть представлена в следующих видах.

1. Непосредственно в единицах измеряемой величины (Δ)

Эта форма используется тогда, когда ошибка не зависит от амплитуды входного сигнала. Часто это связано с дополнительным шумом или системным свойством, но также и с комбинацией всех имеющихся ошибок, таких как калибровка, допуски производителя и т.д. Например, для модуля расхода текучей среды должно быть установлено значение температуры $0,15^\circ\text{C}$ для датчика температуры или 10 футов в минуту для датчика расхода. Обычно рабочий интервал внешнего воздействия включает это состояние и спецификацию точности измерений можно понять как:

- 10 футов в минуту в интервале ниже 100 футов/мин и
- 20 футов в минуту в интервале выше 100 футов/мин.

2. В процентах от значения максимального входного сигнала

Эта форма № 2 полезна для датчика с линейной функцией передачи и тесно связана с приведенной выше формой № 1. Это просто еще один способ сказать то же самое, потому что диапазон ввода должен быть указан практически для любого датчика. Эта форма не подходит для датчика с нелинейной функцией передачи, если не указан небольшой квазилинейный диапазон. Например, термоанемометр (см. разд. 12.3) имеет отклик, который можно смоделировать с помощью функции квадратного корня, т.е. он более чувствителен при малых расходах и менее чувствителен при высоких расходах. Предположим, что датчик имеет диапазон 3000 футов в минуту, а его точность заявлена как 3% от полной шкалы, другими словами, 90 футов в минуту. Однако для измерения малых расходов, например от 30 до 100 кадров в минуту, эта полная погрешность в 90 футов в минуту выглядит огромной и на самом деле вводит в заблуждение из-за нелинейности.

3. В процентах от измеряемой величины

Это мультипликативный способ выражения ошибки, поскольку величина ошибки показана как часть величины сигнала. Это хорошо для датчика с сильно нелинейной функцией передачи. Рассматривая тот же пример из формы № 2 выше, можно утверждать, что 3% измеренного сигнала больше подходит для низкого уровня расхода, потому что это составит всего несколько футов в минуту, в то время как для диапазона высоких расходов это будет уже десятки футов в минуту, что разумно и реалистично. Тем не менее использование этой формы обычно не рекомендуется, поскольку обычно ошибка зависит от внешнего воздействия. Имеет смысл разбить весь нелинейный диапазон на более мелкие квазилинейные участки, а затем использовать форму № 2 для каждого отдельного участка.

4. По выходному сигналу

Этот метод подходит для датчиков с цифровым форматом вывода, когда ошибку можно выразить, например, в единицах младших двоичных разрядов.

Какой именно метод использовать? Ответ часто зависит от применения.

В современных датчиках точность часто характеризуется величиной *статистической ошибки измерений* (см. разд. 3.21), учитывающей влияние как систематических, так и случайных погрешностей и не зависящей от ошибок, допущенных при определении передаточных функций.

3.5. Ошибка калибровки

Ошибка калибровки — это погрешность, допущенная производителем при проведении калибровки датчика на заводе. Эта погрешность носит систематический характер и, значит, добавляется ко всем реальным передаточным функциям. Ошибка калибровки сдвигает характеристику преобразования датчика в каждой точке на определенную величину. Она необязательно должна быть равномерной во всем диапазоне измерений и может зависеть от типа ошибки, допущенной в процессе калибровки. Для примера рассмотрим калибровку в двух точках реальной передаточной функции, показанной толстой линией на рис. 3.4. Для определения наклона и начального сдвига функции на датчик подадим последовательно два внешних воздействия s_1 и s_2 и зарегистрируем два соответствующих выходных сигнала A_1 и A_2 . Первый сигнал был измерен абсолютно точно, однако при определении второго сигнала была допущена погрешность $-\Delta$, что привело к ошибкам при определении коэффициентов a и b . Полученное значение начального сдвига a_1 будет отличаться от реального значения a на величину

$$\delta_a = a_1 - a = \frac{\Delta}{s_2 - s_1}, \quad (3.3)$$

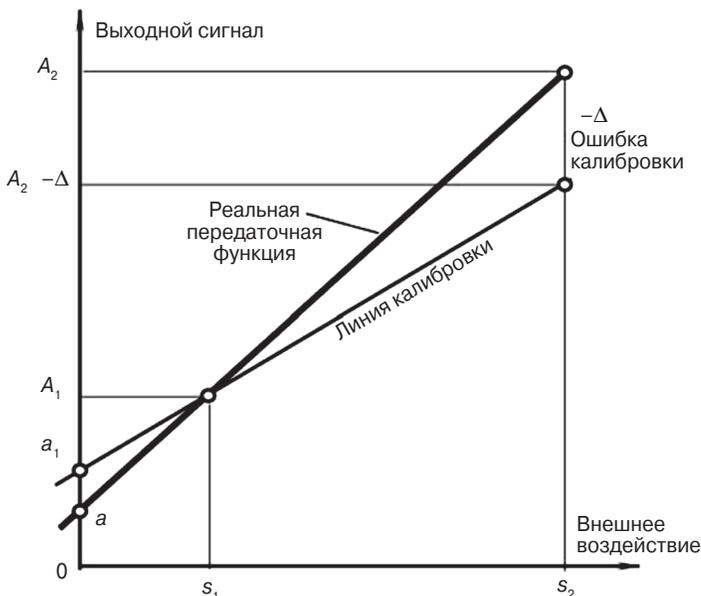


Рис. 3.4. Ошибка калибровки

а наклон будет определен с ошибкой

$$\delta_b = -\frac{\Delta}{s_1 - s_2}. \quad (3.4)$$

Еще один источник ошибок при калибровке – эталонный датчик. Точная калибровка невозможна, если используется не очень точный эталон. Таким образом, важно использовать и поддерживать высокоточные источники опорных сигналов и/или датчики (измерители), соответствующие национальным стандартам.

3.6. Гистерезис

Гистерезис – это разность значений выходного сигнала для одного и того же входного сигнала, полученных при его возрастании и убывании (рис. 3.5). Например, пусть показания датчика перемещений при движении объекта слева направо отличаются на 20 мВ от его показаний при движении объекта в той же самой точке справа налево. Если чувствительность датчика составляет 10 мВ/мм, ошибка гистерезиса в единицах перемещения будет равна 2 мм. Типичной причиной возникновения гистерезиса являются геометрия и конструкция, трение и структурные изменения материалов, особенно пластмасс и эпоксидных смол.

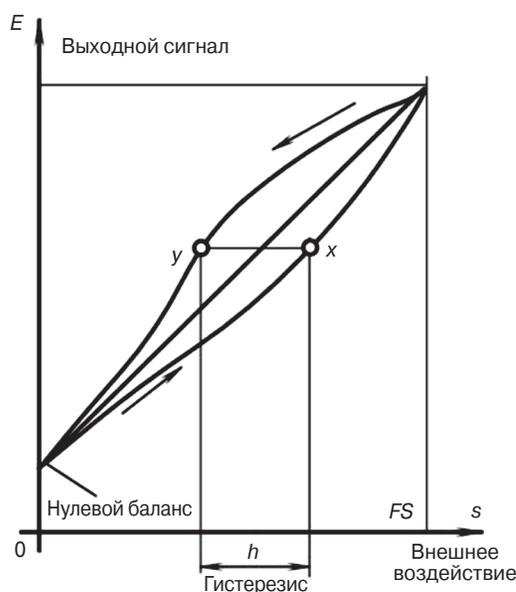


Рис. 3.5. Передаточная функция с гистерезисом

3.7. Нелинейность

Нелинейность определяется для датчиков, передаточную функцию которых возможно аппроксимировать прямой линией (уравнения (2.2) или (2.3)). Под нелинейностью понимается максимальное отклонение L реальной передаточной функции

от аппроксимирующей прямой линии. Под термином «линейность» на самом деле понимается «нелинейность».

При проведении нескольких циклов калибровки выбирается худшее из полученных значений нелинейности. Нелинейность обычно выражается либо в процентах от максимального входного сигнала, либо в единицах измеряемых величин (например в кПа или °С). В зависимости от способа проведения аппроксимирующей линии различают несколько типов линеаризации. Один из способов – проведение прямой через *конечные* точки передаточной функции (рис. 3.6а). Для этого сначала определяются выходные значения, соответствующие наибольшему и наименьшему внешним воздействиям, а потом через эти точки проводится прямая линия (линия 1). При такой линеаризации ошибка нелинейности минимальна в конечных точках и максимальна где-то в промежутке между ними.

На практике в некоторых случаях может потребоваться большая точность линеаризации в узком диапазоне входных сигналов. Например, медицинские термометры должны обладать повышенной точностью в диапазоне 36–38 °С. Вне этой зоны точность может быть несколько ниже. В этом случае калибровку проводят в узкой области, где требуется повышенная точность, после чего через калибровочную точку *c* проводится аппроксимирующая линия (линия 3 на рис. 3.6а). В результате такой процедуры наименьшее значение нелинейности достигается в зоне калибровочной точки, а ближе к концам диапазона измерения линейность значительно ухудшается. Как видно из рисунка, в данном методе аппроксимирующая линия часто является касательной к передаточной функции в точке калибровки *c*. Если известно выражение для реальной передаточной функции, наклон этой линии может быть найден по уравнению (2.17).

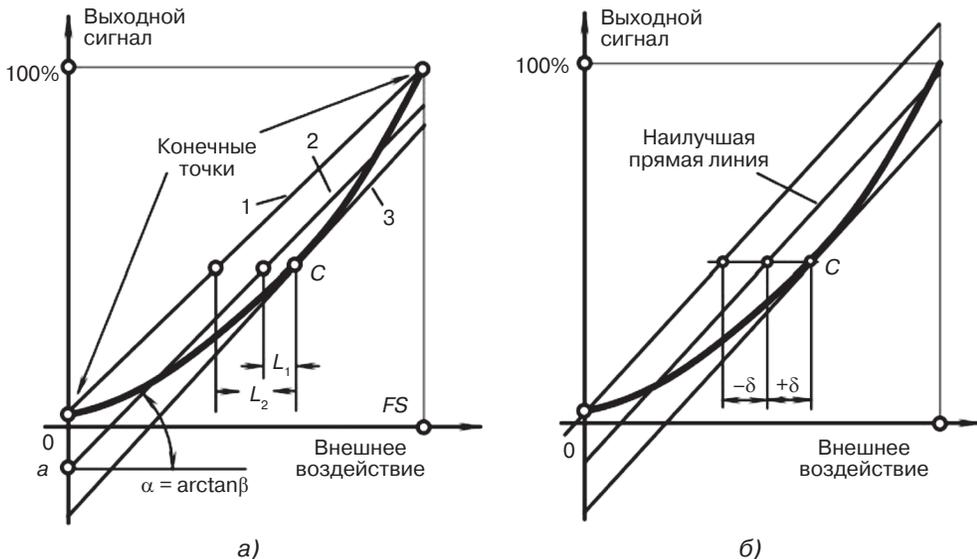


Рис. 3.6. Линейная аппроксимация нелинейной передаточной функции (а) и независимая линеаризация (б)

Метод *независимой линеаризации* часто называется методом наилучшей прямой (рис. 3.6б). Он заключается в нахождении линии, проходящей посередине между двумя параллельными прямыми, расположенными как можно ближе друг к другу и охватывающими все выходные значения реальной передаточной функции. Ее часто используют, когда все внешние воздействия в пределах диапазона равнозначны.

В зависимости от метода линеаризации аппроксимирующие линии будут иметь разные коэффициенты a и b . Следовательно, значения нелинейности, полученные разными способами, могут серьезно отличаться друг от друга.

3.8. Насыщение

Каждый датчик имеет свои пределы рабочих характеристик. Даже если он считается линейным, при определенном уровне внешнего воздействия его выходной сигнал перестанет отвечать приведенной линейной зависимости. В этом случае говорят, что датчик вошел в зону нелинейности или в зону насыщения (рис. 3.7).

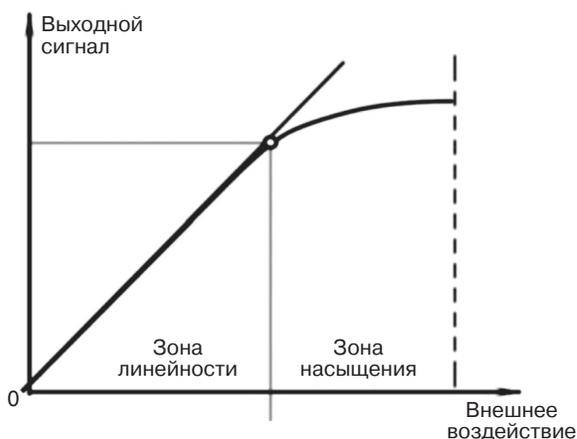


Рис. 3.7. Передаточная функция с насыщением

3.9. Воспроизводимость

Воспроизводимость — это способность датчика при соблюдении одинаковых условий выдавать идентичные результаты. Воспроизводимость результатов определяется по максимальной разности выходных значений датчика, полученных в двух циклах калибровки (рис. 3.8а). Обычно она выражается в процентах от максимального значения входного сигнала (FS):

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS} 100\%. \quad (3.5)$$

Причинами плохой воспроизводимости результатов часто являются тепловой шум, поверхностные заряды, пластичность материалов и т.д.

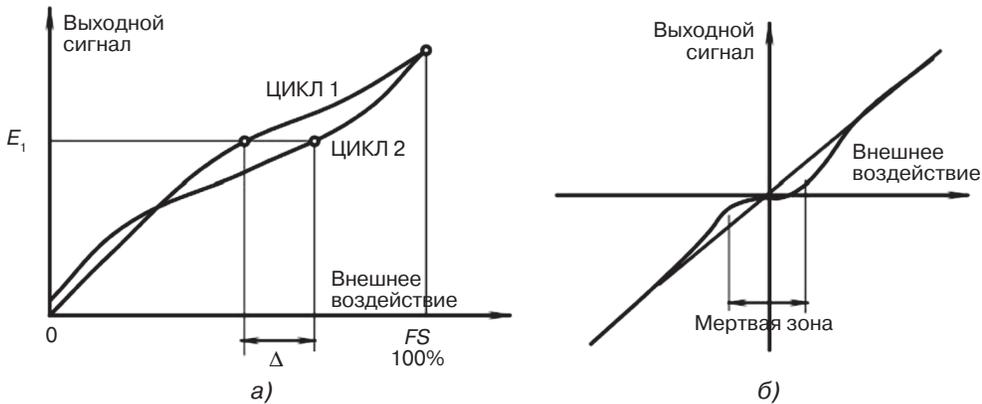


Рис. 3.8. Ошибка воспроизводимости: одному и тому же выходному сигналу соответствуют разные внешние воздействия (а); мертвая зона на передаточной функции (б)

3.10. Мертвая зона

Мертвая зона — это нечувствительность датчика в определенном диапазоне входных сигналов (рис. 3.8б). В пределах этой зоны выходной сигнал остается почти постоянным (часто равным нулю).

3.11. Разрешающая способность

Разрешающая способность характеризует минимальное изменение измеряемой величины, которое может почувствовать датчик. При непрерывном изменении внешнего воздействия в пределах диапазона измеряемых значений выходные сигналы датчиков не будут всегда абсолютно гладкими, даже при отсутствии шумов. На них всегда будут видны небольшие ступеньки. Особенно отчетливо это видно в потенциметрических датчиках, инфракрасных датчиках контроля территории с сетчатой маской и других устройствах, в которых выходные сигналы меняются только при определенных изменениях внешних воздействий. В дополнение к этому при преобразовании любого сигнала в цифровой код происходит его разбивка на маленькие ступеньки, каждой из которых приписывается конкретное значение. Величина изменения входного сигнала, приводящая к появлению минимальной ступеньки на выходном сигнале датчика при определенных условиях, называется его разрешающей способностью. Например, для инфракрасного датчика контроля территории можно дать следующее определение разрешающей способности: «*Разрешающая способность — возможность обнаружения объекта на расстоянии 5 м при его перемещении на 20 см*». Для проволочного потенциметрического датчика, используемого для измерения углов, разрешающая способность — это минимальный угол, равный, допустим, $0,5^\circ$. Иногда разрешающая способность определяется в процентах от полной шкалы FS (максимального значения входного сигнала). Например, для датчика измерения углов, у которого полный диапазон измеряемых значений равен 270° , разрешающую способность $0,5^\circ$ можно представить как

0,181% от FS . Следует отметить, что размер ступени может меняться внутри диапазона измеряемых значений, поэтому, как правило, разрешающая способность определяется либо как средняя, либо как наихудшая величина. Разрешающая способность датчиков с цифровыми выходными сигналами часто задается числом битов слова данных. Например, в описании может быть информация, что разрешение датчика равно 8 бит. Отсюда можно либо получить полный диапазон входных сигналов, либо оценить величину младшего значащего разряда (МЗР). Если на выходном сигнале не удается определить различные ступени, говорят, что датчик обладает *бесконечно большим* разрешением. Термин «бесконечное разрешение» является ошибочным.

3.12. Специальные характеристики

Для некоторых датчиков необходимо указывать *специальные характеристики входных сигналов*. Например, для детекторов освещенности такой характеристикой является его чувствительность в пределах ограниченной оптической полосы. Следовательно, для таких датчиков необходимо определять спектральные характеристики.

3.13. Выходной импеданс

Чтобы наилучшим образом совместить датчик и электронную цепь, необходимо знать выходной импеданс Z_{out} . Выходной импеданс подсоединяется к входному импедансу Z_{in} по параллельному (подключение по напряжению) или последовательному (подключение по току) интерфейсу. На рис. 3.9 показаны два подключения. Входные и выходные импедансы обычно представляются в комплексной форме, поскольку могут включать реактивные компоненты (конденсаторы и индуктивности). Чтобы минимизировать искажения сигнала, генерирующий ток датчик (рис. 3.9б) должен иметь как можно более высокий входной импеданс Z_{out} , в то время как входной импеданс схемы интерфейса должен быть низким. Напротив, для подключения напряжения (рис. 3.9а) датчик должен иметь более низкий Z_{out} , а схема интерфейса должна иметь максимальное значение Z_{in} .

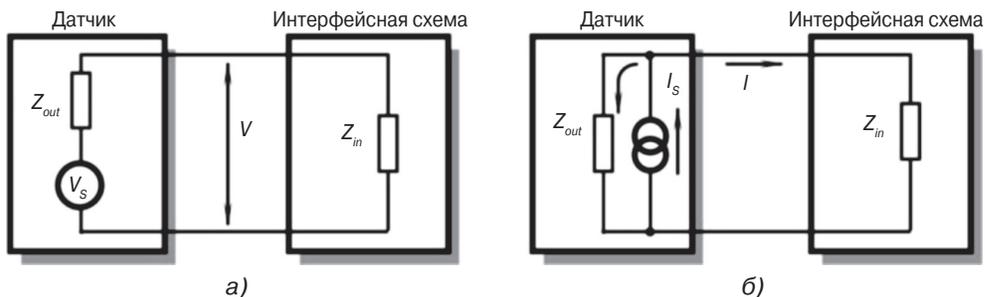


Рис. 3.9. Соединение датчика с интерфейсной схемой: датчик с выходным сигналом в виде напряжения (а); датчик с токовым выходом (б)

3.14. Формат выходного сигнала

Выходным форматом называют набор электрических характеристик, воспроизводимых датчиком в отдельности или интегрированной цепи возбуждения и формирователя сигналов. Характеристики могут включать напряжение, ток, заряд, частоту, амплитуду, фазу, полярность, форму сигнала, временную задержку и цифровой код. На рис. 3.10 показаны примеры выходных электрических сигналов в виде тока и напряжения. Производитель датчика обязан обеспечить полной информацией о формате выходного сигнала для успешного применения его в электронных устройствах.

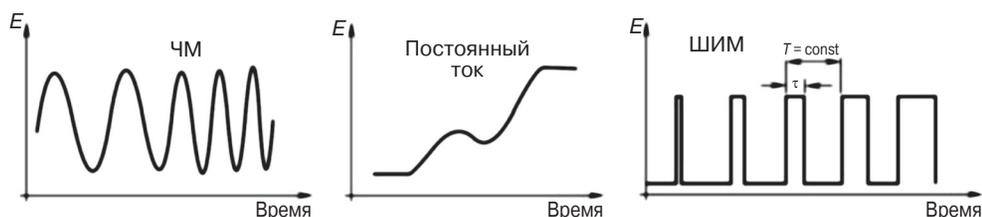


Рис. 3.10. Примеры выходных сигналов: синусоидальная волна постоянной амплитуды с частотной модуляцией (ЧМ), аналоговым сигналом (постоянный ток), изменяющимся в пределах выходного диапазона, и широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) прямоугольных импульсов постоянного периода, но переменной ширины

Наиболее популярным типом цифровой связи между интегрированным датчиком и периферийным устройством является последовательная передача данных. Как следует из названия, при последовательной связи байты информации посылаются последовательно — один бит за один раз. Эти биты передаются в двоичном или текстовых форматах (ASCII). Для связи с интегрированным датчиком с цифровым выходом наиболее часто встречающимися форматами являются широко-импульсная модуляция (ШИМ) или *PC* и их модификации.

Протокол *PC* (произносится как I-квадрат-С) был разработан Philips Semiconductors для передачи данных между устройствами *PC* по двум проводам. Согласно протоколу информация от датчика к периферийному устройству передается последовательно по двум линиям: одна линия для данных (SDA) и одна для времени (SCL). Протокол основан на концепции мастера и ведомого устройства. Мастер — это контроллер (часто микропроцессор), соединенный с шиной и контролирующей часы. Он также генерирует сигналы START и STOP. Ведомое устройство зависит от шины и действует в соответствии с элементами управления или данными, которые им посылает мастер. Мастер может отправлять данные ведомому устройству или получать данные от ведомого устройства, а ведомые устройства не могут обмениваться данными между собой. Базовая скорость связи — от 0 до 100 кГц. Поскольку некоторые датчики работают относительно медленно (например температурные датчики), медленному ведомому устройству может потребоваться остановить передачу данных по шине, пока он собирает и обрабатывает данные. Он может это сделать путем удержания линии синхронизации (SCL) на низком уровне, переводя устройство-мастер в состояние ожидания. Затем мастер ждет сигнала SCL для начала обработки данных.

3.15. Сигнал возбуждения

Сигнал возбуждения — это электрический сигнал, необходимый активному датчику для работы. Сигнал возбуждения описывается интервалом напряжений и/или тока. Для некоторых типов датчиков также необходимо указывать частоту сигнала возбуждения, форму возбуждающего сигнала и его стабильность. Ложные сигналы возбуждения могут изменять функцию передачи датчика, создавать шум и приводить к ошибкам вывода. Примером возбуждающего сигнала является электрический ток, проходящий через термистор для измерения температурнозависимого сопротивления. Приведем пример характеристики сигнала возбуждения:

Максимальный ток, протекающий через термистор	в воздухе без возмущений:	50 мкА
	в воде:	200 мкА

3.16. Динамические характеристики

В стационарных условиях (или в условиях слабоизменяющегося внешнего воздействия) датчик полностью описывается своей передаточной функцией, диапазоном измеряемых значений, калибровочными коэффициентами и т.д. Однако на практике выходной сигнал датчика не всегда достаточно точно отслеживает изменение внешнего сигнала. Причины этого заключаются как в самом датчике, так и в его соединении с источником внешних воздействий, не позволяющим сигналам распространяться с бесконечно большой скоростью. Другими словами, любой датчик обладает параметрами, зависящими от времени, называемыми *динамическими характеристиками*. Если датчик имеет ограниченное быстродействие, он может регистрировать значения внешних воздействий, отличающиеся от реальных. Это означает, что датчик работает с *динамической погрешностью*. Отличие между статическими и динамическими погрешностями заключается в том, что последние всегда зависят от времени. Если датчик входит в состав измерительного комплекса, обладающего определенными динамическими характеристиками, внесение дополнительных динамических погрешностей может привести в лучшем случае к задержке отображения реального значения внешнего воздействия, а в худшем случае — к возникновению колебаний.

Время разогрева — это временная задержка между подачей на датчик электрического напряжения или сигнала возбуждения и моментом, когда датчик начинает работать, обеспечивая требуемую точность измерений. Многие датчики обладают несущественным временем разогрева. Однако некоторым детекторам, особенно работающим в устройствах с контролируемой температурой (термостатах), и множеству химических датчиков, использующих нагреватели, для разогрева требуются секунды, а то и минуты.

В теории автоматического управления (ТАУ) принято описывать взаимосвязь между входами и выходами устройства в виде линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Очевидно, что при решении таких уравнений можно определить динамические характеристики устройства. В зависимости от конструкций датчиков уравнения, описывающие их, могут иметь разный порядок.

Датчики нулевого порядка характеризуются функцией передачи, не зависящей от времени. Такие датчики не имеют никаких устройств сохранения энергии вроде конденсаторов. Датчик нулевого порядка реагирует мгновенно. Другими словами, такие датчики не нуждаются в спецификации динамических характеристик. Обычно почти все датчики имеют ограниченное время отклика, но это время существенно мало и его можно не принимать во внимание.

Дифференциальные уравнения *первого порядка* описывают поведение датчиков, в состав которых входит один энергонакопительный элемент. Такие уравнения имеют вид

$$b_1 \frac{dE(t)}{dt} + b_0 E(t) = s(t). \quad (3.6)$$

Типичный пример датчика первого порядка – датчик температуры, в котором роль энергонакопительного элемента играет теплоемкость датчика в капсуле.

Динамические характеристики датчика первого порядка могут определяться производителем различными способами. Для описания датчиков первого порядка существует несколько способов. Но производители датчиков для этого чаще всего используют *частотные характеристики*, показывающие, насколько быстро датчик может среагировать на изменение внешнего воздействия. Для отображения относительного уменьшения выходного сигнала при увеличении частоты применяется амплитудно-частотная характеристика, показанная на рис. 3.11а. Для описания динамических характеристик датчиков часто используется граничная частота, соответствующая 3-дБ снижению выходного сигнала, показывающая, на какой частоте происходит 30%-е уменьшение выходного напряжения или тока. Эта граничная частота f_u , часто называемая верхней частотой среза, считается предельной частотой работы датчика.

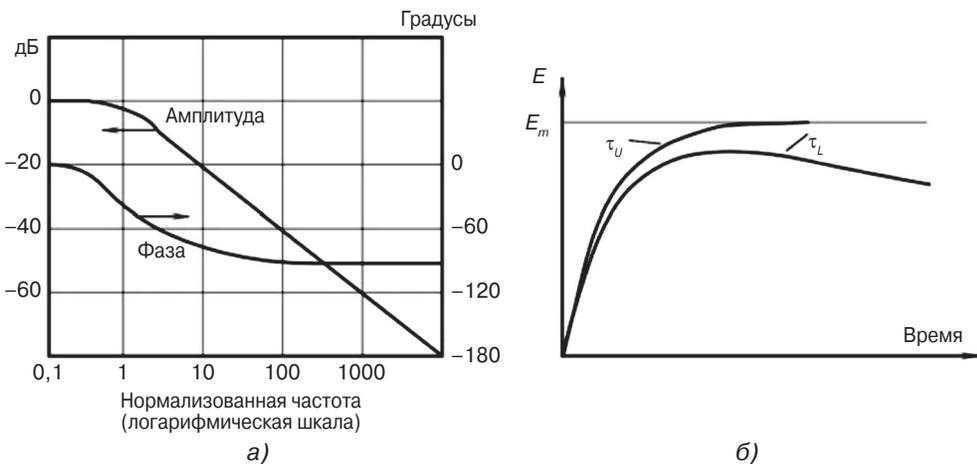


Рис. 3.11. Частотные характеристики: частотная характеристика датчика первого порядка (а); частотная характеристика датчика с ограничениями по верхней и нижней частоте среза, где τ_u и τ_L – соответствующие постоянные времени (б)

Частотные характеристики напрямую связаны с *быстродействием* датчика, выражаемым в единицах внешнего воздействия на единицу времени; как правило, говорят о 63–90%. Какие характеристики, АЧХ или быстродействие, используются для описания датчика, зависит от его типа, области применения и предпочтений разработчика.

Другой способ описания быстродействия заключается в определении времени, требуемого для достижения выходным сигналом датчика уровня 90% от стационарного или максимального значения при подаче на его вход ступенчатого внешнего воздействия. Для датчиков первого порядка очень удобно использовать параметр, называемый *постоянной времени*. Постоянная времени t является мерой инерционности датчика. В терминах электрических величин она равна произведению емкости на сопротивление: $\tau = CR$. В терминах термодинамики следует использовать теплоемкость, теплопроводность или термосопротивление. Решением уравнения (3.6) является временная характеристика системы первого порядка:

$$E = E_m (1 - e^{-t/\tau}), \quad (3.7)$$

где E_m – установившееся значение выходного сигнала, t – время, а e – основание натурального логарифма. Заменяя t на τ , получаем

$$\frac{E}{E_m} = 1 - \frac{1}{e} = 0,6321. \quad (3.8)$$

Другими словами, по истечении времени, равного постоянной времени, выходной сигнал датчика достигает уровня, составляющего приблизительно 63% от установившегося значения. Аналогично можно показать, что по истечении времени, равного двум постоянным времени, уровень выходного сигнала составит 86,5%, а после трех постоянных времени – 95% от величины, которая установится после достаточно длительного промежутка времени.

Частота среза характеризует наименьшую или наибольшую частоту внешних воздействий, которую датчик может воспринять без искажений. Верхняя частота среза показывает, насколько быстро датчик реагирует на внешнее воздействие, а нижняя частота среза – с каким самым медленным сигналом он может работать. На рис. 3.11б показана характеристика датчика, который имеет ограничения как по верхней, так и по нижней частоте среза. На практике для установления связи между постоянной времени датчика первого порядка и его частотой среза f , как верхней так и нижней, используют простую формулу:

$$f_c \approx \frac{0,159}{\tau}. \quad (3.9)$$

Фазовый сдвиг на определенной частоте показывает, насколько выходной сигнал отстает от внешнего воздействия (рис. 3.11а). Сдвиг измеряется либо в градусах, либо в радианах и обычно указывается для датчиков, работающих с периодическими сигналами. Если датчик входит в состав измерительной системы с обратными связями, всегда необходимо знать его фазовые характеристики. Фазовый сдвиг датчика

может снизить запас по фазе всей системы в целом и привести к возникновению неустойчивости.

Дифференциальные уравнения второго порядка описывают поведение датчиков с двумя энергонакопительными элементами:

$$b_2 \frac{d^2 E(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dE(t)}{dt} + b_0 E(t) = s(t). \quad (3.10)$$

Примером датчика второго порядка является акселерометр, в состав которого входит масса и пружина.

На выходах датчиков второго порядка после подачи на их входы ступенчатого воздействия практически всегда появляются колебания. Эти колебания могут быть очень кратковременными, тогда говорят, что датчик демпфирован, или они могут длиться продолжительное время, а то и постоянно, пока внешнее воздействие отсутствует. Продолжительные колебания на выходе датчика являются свидетельством его неправильной работы, поэтому их надо стараться избегать. Любой датчик второго порядка характеризуется *резонансной (собственной) частотой*, которая выражается в герцах или радианах в секунду. На собственной частоте происходит значительное увеличение выходного сигнала датчика. Обычно производители указывают значение собственной частоты датчика и его коэффициент затухания (демпфирования). От резонансной частоты зависят механические, тепловые и электрические свойства детекторов. Обычно рабочий частотный диапазон датчиков выбирается либо значительно ниже собственной частоты (по крайней мере на 60%), либо выше ее. Однако для некоторых типов датчиков резонансная частота является рабочей.

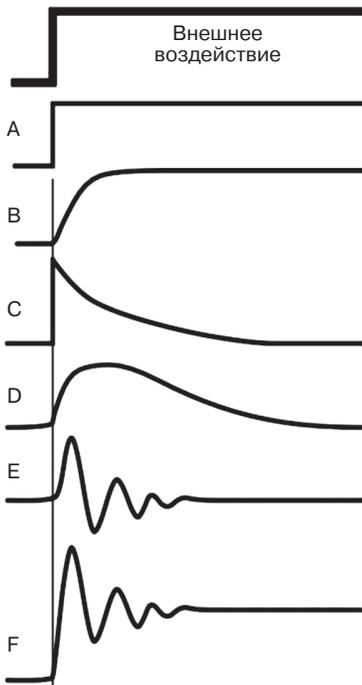


Рис. 3.12. Варианты выходных сигналов: *A* — бесконечные верхняя и нижние частоты, *B* — система первого порядка с ограниченной верхней частотой среза, *C* — система первого порядка с ограниченной нижней частотой среза, *D* — система первого порядка с ограниченными верхней и нижней частотами среза, *E* — система с узкой полосой частот (резонансная система), *F* — широкополосная система с резонансом

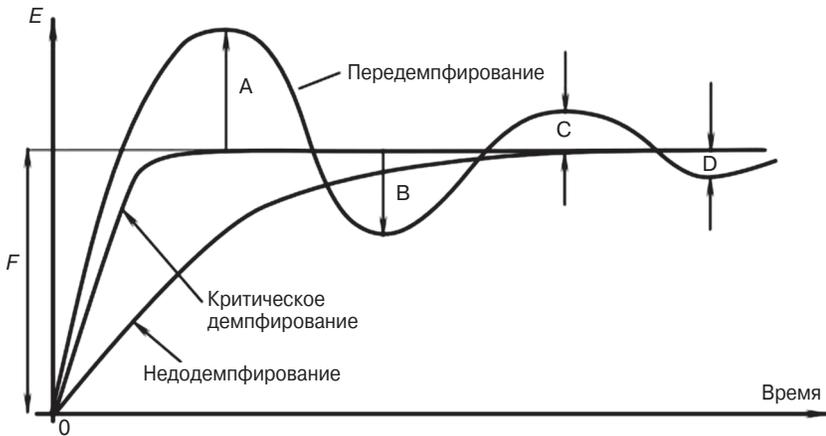


Рис. 3.13. Виды выходных сигналов в датчиках с разным коэффициентом демпфирования

Например, детекторы разрушения стекла, используемые в охранных системах, настраиваются на узкую полосу частот, свойственных внешнему воздействию в зоне частоты резонанса, характерной для акустического спектра, производимого разбивающимся стеклом. На рис. 3.12 показаны отклики датчиков, имеющих разные частоты отсечки.

Демпфирование — это значительное снижение или подавление колебаний в датчиках второго и более высоких порядков. Когда выходной сигнал устанавливается достаточно быстро и не выходит за пределы стационарного значения, говорят, что система обладает критическим затуханием, а ее коэффициент демпфирования равен 1 (рис. 3.13). Когда коэффициент затухания меньше 1 и выходной сигнал превышает установившееся значение, говорят, что система недодемпфирована. А когда коэффициент затухания больше 1 и сигнал устанавливается гораздо медленнее, чем в системе с критическим затуханием, говорят, что система передемпфирована. Демпфирование в датчике может быть представлено в виде специального компонента (демпфера), обладающего «тягучими» свойствами, например жидкости (воздуха, масла, воды).

Для колебательного выходного сигнала, показанного на рис. 3.13, *коэффициент затухания или демпфирования* определяется абсолютным значением отношения большей амплитуды к меньшей пары последовательно взятых полувольт колебаний относительно установившегося значения, т.е. можно записать:

$$\text{Коэффициент демпфирования} = \frac{F}{A} = \frac{A}{B} = \frac{B}{C} = \dots \quad (3.11)$$

3.17. Динамические модели элементов датчиков

Для определения динамического отклика датчика необходимо приложить к нему внешнее воздействие и измерить значения выходного сигнала. В общем случае тестовое внешнее воздействие может быть разной природы и может иметь любую форму сигнала в соответствии с практическими нуждами тестируемого датчика. Например, при определении собственной частоты акселерометра оптимальным

решением будут синусоидальные колебания различной частоты. С другой стороны, для температурного зонда предпочтительнее использовать ступенчатую функцию температуры. Во многих других случаях часто применяют ступенчатую или П-образную функцию температуры. Причиной использования ступенчатой функции или импульсов является их теоретически бесконечный спектр частоты. Вот почему датчик тестируется на всех частотах одновременно.

Математическое моделирование датчиков – мощный инструмент расчетов их эффективности. Моделирование бывает двух типов – статическое и динамическое. Модели обычно составляются для исследования функций передачи датчика. Ниже приведено описание процедуры динамических расчетов некоторых типов датчиков. В динамических моделях могут быть несколько независимых переменных, одна из которых – время. Полученная модель называется моделью с сосредоточенными параметрами. В этом разделе математические модели создаются на основе применения законов физики для некоторых простых элементов датчика с сосредоточенными параметрами. Другими словами, датчик разделяют на отдельные простые элементы и рассматривают их по отдельности. Однако, как только уравнения, описывающие элементы, составлены, отдельные элементы могут быть повторно объединены для получения общей математической модели исходного датчика. Этот способ предназначен скорее для знакомства с темой, чем для глубокого в нее погружения.

3.17.1. Механические элементы

Динамические механические элементы – это массы, обладающие инерцией, подсоединенные к пружинам или демпферам. Часто демпфирование имеет вязкий характер, и для него при прямолинейном движении скорость пропорциональна останавливающей силе. Аналогично для вращательного движения удерживающая сила пропорциональна угловой скорости. Кроме того, сила, или крутящий момент, прилагаемый к пружине или валу, обычно пропорциональна смещению. Различные элементы датчика и их определяющие уравнения сведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Механические, тепловые и электрические демпферы

Механические	Тепловые	Электрические	
Масса  $F = \frac{d(v)}{dt}$	Емкость  $Q = \frac{dT}{dt}$	Индуктивность  L $V = L \frac{di}{dt}$	Конденсатор  $i = C \frac{dV}{dt}$
Пружина  $F = k \int v dt$	Емкость  $T = \frac{1}{C} \int Q dt$	Конденсатор  C $V = \frac{1}{C} \int i dt$	Индуктивность  L $i = \frac{1}{L} \int V dt$
Демпфер  $F = bv$	Сопротивление  R $Q = \frac{1}{R} (T_2 \cdot T_1)$	Резистор  R $V = Ri$	Резистор  R $i = \frac{1}{R} V$

Одним из простейших способов составления уравнений движения является рассмотрение каждой инертной массы по отдельности, в качестве свободного тела. Далее рассматривается отклонение от положения равновесия каждого из свободных тел, при котором возникают силы и моменты сил, стремящиеся вернуть тела в исходное положение. Применяя второй закон Ньютона, можно вывести общее уравнение движения для всех входящих в систему тел.

В случае прямолинейного движения второй закон Ньютона гласит, что для замкнутой системы *сумма сил, действующих на тело, равна произведению массы тела на ускорение*. Если используется система СИ, сила измеряется в ньютонах (Н), масса – в килограммах (кг), а ускорение – в метрах в секунду в квадрате (м/с^2).

Для вращательного движения закон Ньютона гласит: *сумма всех моментов сил, приложенных к данному телу, равна его моменту инерции, умноженному на угловое ускорение*. Момент, или момент инерции, выражается в ньютон-метрах (Нм), инерция – в килограммах на метр квадратный (кг/м^2), а угловое ускорение – в радианах за секунду в квадрате (рад/с^2).

Подробная математическая модель линейного акселерометра представлена в разд. 9.3.1.

3.17.2. Тепловые элементы

Тепловые элементы датчиков включают в себя такие части, как радиаторы, нагревающие и охлаждающие элементы, изоляторы, тепловые отражатели и поглотители. Очевидно, нужно учитывать фактор общего нагрева всего устройства, а датчик следует рассматривать не как отдельную единицу, а как его компонент. Другими словами, теплопроводностью корпуса и составных элементов, конвекцией воздуха и теплообменом не следует пренебрегать (см. обсуждение в разд. 17.1).

Тепловая энергия может передаваться тремя способами: передачей, естественной или принудительной конвекцией и в виде теплового излучения (разд. 4.12). Для моделей с простыми сосредоточенными параметрами в целях определения изменения температуры тела можно использовать первое начало термодинамики. Скорость изменения внутренней энергии тела равно потоку тепла в тело минус поток тепла из тела наподобие того, как жидкость движется по трубам в резервуар и из него. Этот баланс тепла может быть выражен в виде

$$C \frac{dT}{dt} = \Delta Q, \quad (3.12)$$

где $C = Mc$ – теплоемкость тела (Дж/К), T – температура (К), ΔQ – расход тепла (Вт), M – масса тела (кг), c – удельная теплоемкость материала тела (Дж/кгК). Разность тепловых потоков является функцией теплового сопротивления тела. Обычно его выражают как

$$\Delta Q = \frac{T_1 - T_2}{r}, \quad (3.13)$$

где r – термосопротивление (К/Вт) и $T_1 - T_2$ – температурный градиент вдоль элемента, для которого рассчитывается теплопроводность.

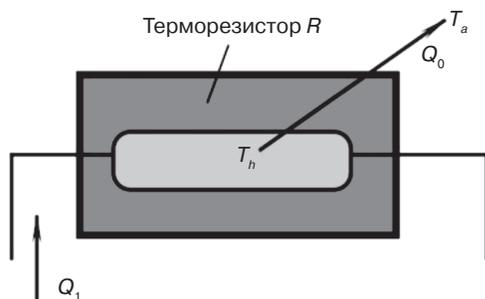


Рис. 3.14. Тепловая модель нагревающего элемента

В качестве примера проанализируем элемент (рис. 3.14), имеющий температуру T_h . Элемент имеет изолирующую оболочку. Температура окружающего воздуха – T_a . Величина Q_1 – это расход тепла, подаваемого на элемент, а Q_0 – тепловые потери. Из уравнения 3.12 получим:

$$C \frac{dT_h}{dt} = Q_1 - Q_0, \quad (3.14)$$

но из уравнения (3.13) следует, что

$$Q_0 = \frac{T_h - T_a}{r}, \quad (3.15)$$

в результате получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dT_h}{dt} + \frac{T_h}{rC} = \frac{Q_1}{C} + \frac{T_a}{rC}. \quad (3.16)$$

Это дифференциальное уравнение первого порядка, типичное для тепловых систем. Тепловой элемент, не входящий в систему управления цепью обратной связи, является устойчивым. Отклик термоэлемента можно охарактеризовать тепловой постоянной времени, возникающей при данной теплоемкости и термосопротивлении: $\tau T = Cr$. Постоянная времени измеряется в единицах времени (с) и в случае пассивного охлаждающего элемента равна времени, за которое будет достигнуто значение, приблизительно равное 63% от первоначального температурного градиента.

3.17.3. Электрические элементы

Существуют три типа электрических элементов: конденсатор, индуктивность и резистор. Напомним, что основное уравнение, описывающее идеальные элементы, содержится в табл. 3.3. Для идеальных элементов уравнения, описывающие поведение датчика, выведены из правил Кирхгофа, полученных на основании закона сохранения энергии.

Первое правило Кирхгофа: суммарный ток, втекающий в узел, равен сумме токов, вытекающих из узла, т.е. алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.

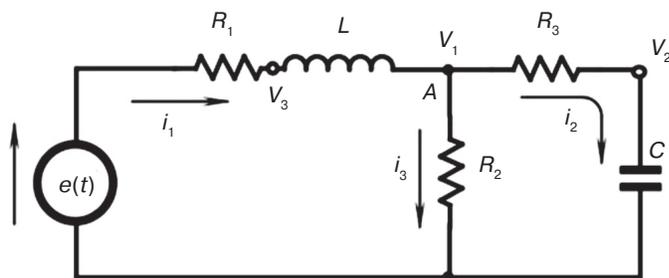


Рис. 3.15. Схема электрической цепи с сопротивлением, емкостными и индуктивными элементами

Второй закон Кирхгофа: в замкнутой цепи алгебраическая сумма напряжений всех частей цепи равна приложенному ЭДС.

Рассмотрим датчик, элементы которого могут быть представлены в виде схемы, показанной на рис. 3.15. Для нахождения уравнения цепи будем использовать первое правило Кирхгофа, иногда называемое законом Кирхгофа для токов. Для узла цепи имеем

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0, \quad (3.17)$$

а для каждого из токов —

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{e - V_3}{R_1} = \frac{1}{L} \int (V_3 - V_1) dt; \\ i_2 &= \frac{V_1 - V_2}{R_3} = C \frac{dV_2}{dt}; \\ i_3 &= \frac{V_1}{R_2}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

При подстановке этих выражений в уравнение (3.17) получим уравнение

$$\frac{V_3}{R_1} + \frac{V_1 - V_2}{R_3} + 2 \frac{V_1}{R_2} + C \frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{L} \int (V_3 - V_1) dt = \frac{e}{R_1}. \quad (3.19)$$

В этом уравнении e/R_1 — вынуждающая сила на входе, а V_1, V_2, V_3 — измеряемые значения выходных напряжений. Для вывода вышеуказанного уравнения должны быть определены три переменные i_1, i_2, i_3 и получены три уравнения движения. Применяя уравнение (3.17) при $i_1 - i_2 - i_3 = 0$, можно привести все три уравнения движения к одному выражению. Отметим, что каждый элемент этого выражения имеет размерность тока (ампер).

3.17.4. Аналогии

Выше мы рассмотрели механические, тепловые и электрические элементы по отдельности. Однако динамическое поведение этих систем аналогично. Например, возможно взять механические или тепловые элементы, преобразовать их в эквива-

лентную электрическую цепь и проанализировать, используя правила Кирхгофа. Табл. 3.3 содержит разные сосредоточенные параметры механических, тепловых и электрических цепей совместно с их основными уравнениями. Для механических компонент использовался второй закон Ньютона, а для тепловых мы применили закон охлаждения Ньютона.

В первой колонке находятся линейные механические элементы и их уравнения в терминах силы (F). Во второй колонке – линейные тепловые элементы и их уравнения в терминах количества теплоты (Q). В третьей и четвертой колонках таблицы содержатся электрические аналоги (конденсатор, индуктор и резистор) в терминах напряжений и тока (V и i). Эти аналогии могут быть весьма полезны при практических расчетах датчиков и для анализа их механического или теплового взаимодействия с объектом или окружающей средой.

3.18. Факторы окружающей среды

Каждый датчик подвергается воздействию окружающей среды на стадии как хранения, так и эксплуатации. Все возможные варианты воздействия окружающей среды, которые могут влиять на работу датчика, обычно описываются производителями.

Условия хранения – совокупность предельных значений факторов окружающей среды, воздействующих на датчик в течение определенного промежутка времени, при которых не происходит существенного изменения его рабочих характеристик и обеспечивается поддержание его работоспособности. Обычно условия хранения устанавливают максимальную и минимальную температуры хранения, а также максимальную относительную влажность при этих температурах. К значению относительной влажности необходимо добавить такую характеристику, как «отсутствие конденсата». В зависимости от физической природы датчика могут указываться дополнительные условия хранения, например максимальное давление, наличие некоторых газов или отсутствие вредных испарений.

Краткосрочная и долгосрочная стабильность (дрейф) – характеристики точности датчиков. Краткосрочная стабильность описывает изменения рабочих характеристик датчика в течение минут, часов и даже дней. Выходной сигнал датчика может увеличиваться или уменьшаться, что может быть выражено через величину шума сверхнизкой частоты. Долгосрочная стабильность зависит от процессов *старения*, которые изменяют электрические, механические, химические и термические свойства материалов датчика. Долгосрочный дрейф параметров может измеряться достаточно длительными интервалами времени – месяцами и годами. В конце концов, это еще один путь для получения повторяемости (см. выше), поскольку дрейф может быть двунаправленным. Вот почему долгосрочная стабильность является очень важной характеристикой для датчиков, используемых для прецизионных измерений. Скорость старения определяется условиями хранения и эксплуатации, а также тем, насколько хорошо элементы датчиков изолированы от окружающей среды и какие материалы использовались для их изготовления. Интенсивное старение типично для датчиков, в состав которых входят

органические компоненты, и не столь существенно для датчиков из неорганических элементов. Например, металлооксидные термисторы в стеклянных корпусах обладают лучшей долговременной стабильностью, чем такие же термисторы, покрытые эпоксидной смолой. Для повышения долговременной стабильности элементы датчиков подвергают термоциклической подготовке, моделирующей экстремальные условия работы. Например, датчик может периодически перемещаться из среды с температурой замерзания в среду с очень высокой температурой. Такая термоциклическая подготовка повышает стабильность характеристик датчиков, позволяет обнаружить скрытые дефекты и произвести отбраковку негодных устройств. Например, стабильность термисторов значительно повышается, если перед калибровкой и установкой в прибор они в течение месяца выдерживались при температуре $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В перечень условий окружающей среды, воздействующих на датчики во время обычной эксплуатации, практически никогда не входят физические параметры, измеряемые датчиками. Например, для датчика, определяющего давление воздуха, учитываются следующие факторы окружающей среды: температура воздуха и рядом расположенных объектов, влажность, вибрации, ионизирующая радиация, электромагнитные поля, гравитационные силы и т.п. Все эти параметры не только могут, но и влияют на рабочие характеристики датчика. При этом необходимо учитывать как динамические, так и статические составляющие этих факторов. Многие из параметров окружающей среды имеют мультипликативную природу, т.е. они влияют на передаточную функцию датчика, например меняют его чувствительность. Примером этого эффекта является поведение тензорного датчика, чувствительность которого увеличивается с ростом температуры.

Очень важным требованием для современных датчиков является обеспечение их стабильной работы в разнообразных условиях окружающей среды. Поэтому разработчики, а также экспериментаторы всегда должны учитывать все возможные внешние воздействия, способные повлиять на рабочие характеристики датчиков. Например, на выходе пьезоэлектрического акселерометра могут появляться паразитные сигналы из-за резкого изменения окружающей температуры, электростатического разряда, образования электрических зарядов (эффект трибоэлектричества), вибрации соединительных проводов, электромагнитной интерференции (ЭМИ) и т. п. Даже если производитель датчика не указал эти факторы, экспериментатор должен проверить его действие в конкретных условиях эксплуатации и в случае необходимости (при реальном ухудшении рабочих характеристик из-за влияния внешних факторов) принять соответствующие меры (см. гл. 4), например поместить датчик в защитный корпус, использовать электрический экран, применить теплоизоляцию или термостат, применить дифференциальную конструкцию.

Температура окружающей среды влияет на рабочие характеристики датчиков, поэтому всегда должна приниматься во внимание. Рабочий диапазон температур — это интервал окружающих температур, задаваемых верхним и нижним предельными значениями (например $-20\dots+150\text{ }^{\circ}\text{C}$), внутри которого датчик работает с заданной точностью. Характеристики многих датчиков сильно зависят от окружающей температуры. Для снижения температурных погрешностей в состав самих датчиков или

в схемы преобразователей сигналов часто встраиваются специальные компенсационные элементы. Самый простой способ определения допусков по температуре заключается в установлении интервалов внутри рабочего диапазона температур, для каждого из которых указывается индивидуальная погрешность. Например, в паспортных данных может быть указано, что в интервале температур $0...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ точность датчика составляет 1%, в интервалах $-20...0$ и $+50...100\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 2%, в остальных интервалах в пределах диапазона измеряемых температур ($-40...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 3%. Температура окружающей среды также влияет на динамические характеристики, особенно в случаях, когда применяется вязкостное демпфирование. Сравнительно быстрые изменения температур могут привести к появлению паразитных сигналов на выходах датчиков. Например, пироэлектрический чувствительный элемент, используемый в детекторах движения, практически не реагирует на медленное изменение окружающей температуры. Однако при быстром скачке температуры на его выходе может появиться электрический сигнал (ток), распознаваемый электронными цепями как отклик на внешнее воздействие, что приводит к ошибкам детектирования.

Погрешность саморазогрева появляется в датчиках, нагреваемых от сигнала возбуждения настолько, что это начинает влиять на его точностные характеристики. Например, через термисторный датчик температуры необходимо пропускать электрический ток, что приводит к существенному рассеянию тепла внутри его конструкции. При этом степень саморазогрева датчика зависит от его конструктивных особенностей и от условий окружающей среды: либо это сухой воздух, либо жидкость и т.д. Саморазогрев датчика приводит к появлению ошибок при измерении температуры, поскольку термистор начинает работать как источник дополнительной тепловой энергии с ростом температуры. Взаимодействие с окружающей средой, в которой работает датчик, определяется ее типом – сухой контакт, жидкость, воздух и т.д. Самый сильный разогрев датчиков наблюдается в среде стоячего воздуха. Для термисторов производители часто указывают погрешность саморазогрева при работе в воздухе, стоячей жидкости и других средах.

Увеличение температуры резистивного датчика относительно температуры окружающей среды можно найти при помощи формулы

$$\Delta t^{\circ} = \frac{V}{R(\xi v c + \alpha)}, \quad (3.20)$$

где ξ – плотность массы датчика, c – удельная теплоемкость, v – объем датчика, α – коэффициент теплопроводности (описывающий взаимосвязь датчика с внешней средой), R – электрическое сопротивление, V – эффективное напряжение на сопротивлении. Это выражение часто используется разработчиками для оценки погрешности от саморазогрева. Из выражения (3.20) видно, что для увеличения коэффициента α необходимо обеспечивать плотный контакт датчика с объектом измерения при одновременном увеличении площади контакта, для чего можно применять теплопроводные смазочные и адгезионные вещества. В целях уменьшения погрешности саморазогрева предпочтительнее использовать высокорезистивные датчики и датчики с низким рабочим напряжением.

3.19. Надежность

Надежность – это способность изделия (датчика) выполнять требуемые функции при соблюдении определенных условий в течение заданного промежутка времени. Если использовать статистические термины, можно дать следующее определение: надежность – это вероятность того, что устройство будет функционировать без *поломок* в течение указанного интервала времени или заданного количества циклов. Следует отметить, что *надежность* не является характеристикой дрейфа или шума. Она отражает время до выхода устройства из строя (*отказа*), либо временного, либо постоянного, при соблюдении регламентированных условий эксплуатации.

Несмотря на то что надежность является очень важной характеристикой, она редко указывается производителями датчиков. Возможно, причина этого заключается в отсутствии общепринятых способов ее измерения.

3.19.1. СВМО

В США для многих электронных приборов в качестве способа определения эксплуатационной надежности применяется процедура вычисления среднего времени между отказами (СВМО), описанная в стандарте MIL-HDBK-217. Поскольку датчики, как правило, неремонтируемые устройства и могут быть заменены, их не будут ремонтировать. Такие датчики удобнее охарактеризовать СВМО – средним временем до отказа, или средним временем работы до отказа устройства. СВМО можно определить применительно к устройству и рассчитать по формуле

$$\text{MTTF} = \frac{1}{n} \sum_i (t_{fi} - t_{0i}), \quad (3.21)$$

где t_0 – время начала теста, t_f – время отказа, n – общее количество протестированных устройств, i – номер устройства. Это означает, что каждое тестируемое устройство должно доработать до отказа (ремонтпригодного или фатального) и среднее время работы наработки на отказ должно быть рассчитано.

СВМО-тесты должны проводиться в экстремальных (не обычных или типичных) условиях эксплуатации.

3.19.2. Экстремальное испытание

О надежности устройства можно судить после испытаний в экстремальных условиях. Эта процедура основана на определении СВМО всего устройства после вычисления СВМО его отдельных элементов, при этом необходимо учитывать влияние внешних факторов: температуры, давления, механических напряжений, степени экранирования и многих других, например влажности, ионизирующего излучения, шока и вибрации и т.д.

Экстремальные тесты особенно полезны на этапе проектирования датчика для выявления скрытых проблем. Во время экстремальных испытаний датчик может подвергаться воздействию некоторых жестких факторов окружающей среды, которые потенциально могут изменить его работу или обнаружить скрытые дефекты. Среди дополнительных тестов, которые могут выявить такие проблемы, отметим:

- тестирование при высокой температуре и высокой влажности при максимальном напряжении питания. Например, датчик должен работать при максимально допустимой температуре и относительной влажности 85–90% в течение 500 часов. Такое тестирование является очень полезным для обнаружения загрязнений и оценки целостности корпусов устройств. Отказы наиболее вероятно происходят при температуре 85 °С и относительной влажности 85%. Такую проверку часто называют «тестированием 85–85» или «температурно-влажностным смещением»;
- для моделирования неблагоприятных условий окружающей среды при проверке надежности соединений – проводных, клеевых и т.п., датчики часто подвергаются воздействию механических ударов и вибрациям;
- для получения высоких значений ускорений моделируется падение датчика. Часто требуется проводить такие испытания относительно разных осей устройства. Частота гармонических колебаний, прикладываемых к датчику при вибрационном тестировании, должна изменяться в интервале, включающем его собственную частоту. В США в оборонной промышленности при проведении механических тестов часто используются методы 2016 и 2056 стандарта 750;
- для моделирования экстремальных условий хранения и перевозок датчик как минимум 1000 часов выдерживается либо при очень высоких (+100 °С), либо при очень низких температурах (–40 °С). Этот вид тестирования проводится, как правило, на неработающих устройствах. Выбор верхнего и нижнего температурных пределов должен проводиться в соответствии с физической природой датчиков. Например, для пирозлектрических TGS-датчиков фирмы Philips, характеризующихся точкой Кюри +60 °С, эта температура никогда не должна превышать +50 °С, что всегда должно быть четко указано на их корпусах;
- для проверки поведения датчиков при экстремально изменяющихся внешних условиях их подвергают воздействию теплового шока или циклических температур. Например, устройство находится в течение 30 минут в среде с температурой –40 °С, после чего быстро перемещается на 30 минут в среду с температурой + 100 °С и так много раз. Количество таких циклов, как правило, лежит в пределах 100–1000. Этот тест помогает обнаруживать дефекты разных типов соединений и проверяет целостность корпуса;
- для моделирования условий морских перевозок датчики могут подвергаться воздействию соляных туманов в течение определенного интервала времени (например 24 часов). Такое тестирование помогает определять устойчивость устройств к коррозии и обнаруживать дефекты корпусов.

3.19.3. Ускоренное тестирование времени эксплуатации

Еще одним важным методом проверки надежности датчиков является ускоренное испытание на долговечность. Это процедура, имитирующая работу датчика в экстремальных условиях эксплуатации, при которой годы службы сжимаются до недель. Этим преследуются три цели: установить СВМО, определить первые точки

отказа, чтобы избавиться от них с помощью конструктивных изменений датчика, определить общий практический срок эксплуатации системы.

3.19.3.1. Ускоренное тестирование датчиков методом экстремальных условий среды эксплуатации

Один из возможных способов сокращения времени тестирования датчика – использование значений рабочего цикла, включая максимальную нагрузку и циклы включения и выключения, при экстремальных (превышающих границы диапазона обычной эксплуатации) параметрах окружающей среды (температура, влажность и давление). Верхний и нижний пределы должны быть значительно шире, чем при нормальных условиях эксплуатации датчика. При этом текущие рабочие характеристики могут выходить за рамки технических характеристик, но должны вернуться к тем же значениям, когда устройство будет возвращено в указанный рабочий диапазон параметров окружающей среды. Например, если датчик предназначен для работы при температуре до 50 °С при максимальной относительной влажности 85% и при максимальном напряжении питания +15 В, его можно циклически переключать до температуры 100 °С при относительной влажности 99% и при напряжении питания +18 В (т.е. ниже максимально допустимых напряжений). Чтобы оценить количество циклов испытаний (n), можно использовать следующую эмпирическую формулу, разработанную Sundstrand Corporation, Rockford, IL и Interpoint Corp., Redmond, WA [1]:

$$n = N \left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{test}}} \right)^{2,5}, \quad (3.22)$$

где N – расчетное число циклов эксплуатации, ΔT_{\max} – максимальная указанная флуктуация температур, ΔT_{test} – максимальная циклическая флуктуация температур во время испытаний. Например, если нормальная температура 25 °С, циклическая будет 100 °С и время жизни датчика (скажем, 10 лет) составит величину порядка 20 000 циклов, в то время как число циклов испытаний может быть вычислено по формуле

$$n = 20\,000 \cdot \left(\frac{100 - 25}{25 - 25} \right)^{2,5} = 1283. \quad (3.23)$$

В результате для ускоренного испытания на ресурс требуется около 1300 циклов вместо 20 000. Однако следует отметить, что коэффициент мощности 2,5 был получен умножением на значение величины усталости припой, так как этот элемент сильно зависит от числа циклов. Некоторые датчики вообще не имеют паяных соединений, в то время как другие могут иметь компоненты, еще более чувствительные к числу циклов испытаний, чем припой, например электропроводящая эпоксидная смола. Тогда коэффициент следует выбрать несколько меньшим. В результате теста надежность может быть выражена как вероятность отказа. Например, если 2 из 100 датчиков (с расчетным сроком службы 10 лет) не прошли тест, то надежность определяется как 98% за 10 лет. Для лучшего понимания ускоренных испытаний

на долговечность и ускоренное старение см. отличный текст в [5]. Получение максимальной информации о надежности в короткие сроки и с минимальными затратами – основная цель производителя. В то же время нецелесообразно ждать отказов, когда срок службы типовых современных датчиков составляет сотни тысяч часов. Таким образом, ускоренное тестирование является обязательным и мощным средством при производстве.

3.19.3.2. Ускоренные испытания на долговечность и сохраняемость (УИДС)

Для выявления потенциальных проблем в процессе НИОКР в настоящее время широко используется *высокоускоренное испытание на долговечность и сохраняемость* (УИДС) [6] в различных модификациях. В этом тестировании датчик рассматривается как «черный ящик» независимо от его внутренней структуры или функциональности. УИДС предназначен для определения слабых мест датчика, оценки его пределов надежности, повышения его прочности путем приложения повышенных нагрузок (необязательно механических и необязательно ограниченных ожидаемыми полевыми напряжениями), которые могут вызвать поломки в полевых условиях. УИДС часто включает в себя переходные нагрузки, быстрые температурные изменения и другие средства, позволяющие проводить испытания с минимальными затратами времени и средств. УИДС иногда называют тестом «выявление». Это не квалификационное испытание, которое является тестом «прошел / не прошел», необходимым для изготовления датчика и обеспечения его надежности. За прошедшие годы УИДС продемонстрировал свою способность повышать надежность с помощью процесса «тест – сбой – исправление», в котором приложенные напряжения и внешние воздействия несколько превышают указанные рабочие пределы. Однако это «несколько выше» основано скорее на интуиции испытателей, чем на расчетах. Существует общее мнение, что УИДС может быстро ускорить и идентифицировать сбои различного происхождения.

3.19.3.3. Ускоренное тестирование на отказ (УТО)

В дополнение к УИДС, а в некоторых случаях и вместо него, может проводиться узконаправленное и очень экономичное *ускоренное тестирование на отказ* (УТО) [7]. В отличие от УИДС, УТО касается реальных физических или химических эффектов внутри датчика. Тестирование основано на теоретической модели функции передачи и других свойств устройства, которые можно моделировать аналитически или численно. Цель УТО – использовать конкретную прогностическую модель (например модель Аррениуса) для подтверждения (после проведения УИДС) фактического механизма отказа и определения числовых характеристик (энергия активации, постоянная времени, коэффициенты чувствительности и т.д.), а также улучшения конструкции. Модели УТО позволяют прогнозировать сбои. Очевидно, основное предположение состоит в том, что модель действительна для датчика в реальных условиях эксплуатации. Следовательно, УИДС может использоваться для «грубой настройки» надежности устройства, тогда как УТО следует использовать всякий раз, когда требуется «точная настройка». УИДС и УТО могут быть выполнены отдельно или частично объединены в конкретном ускоренном испытании.