



МИР ЭЛЕКТРОНИКИ

В.М. Шарапов

Е.С. Полищук

Н.Д. Кошевой

Г.Г. Ишанин

И.Г. Минаев

А.С. Совлуков

ДАТЧИКИ

Под общ. ред. В.М. Шарапова,
Е.С. Полищука

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2012

УДК 621.317.39
ББК 32.96-04
Д21

Рецензент:

Тымчик Г.С., д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета, зав. кафедрой производства приборов Национального технического университета Украины «КПИ»

Д21 Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапов, Е.С. Полищука
Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., ISBN 978-5-94836-316-5

В книге изложены теоретические основы, принципы действия, описаны конструкции и характеристики датчиков физических величин.

Книга предназначена для научных работников, студентов, аспирантов, специалистов в области разработки датчиков, измерительных приборов, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

УДК 621.317.39
ББК 32.96-04

Авторы:

*Шарапов В.М., Полищук Е.С., Кошевой Н.Д.,
Ишанин Г.Г., Минаев И.Г., Совлуков А.С.*

© 2012, В.М. Шарапов, Е.С. Полищук и др.
© 2012, ЗАО «РИЦ «Техносфера»,
оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-316-5

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	12
Глава 1. Основные понятия и определения. Классификация датчиков	13
1.1. Термины и определения	14
1.2. Классификация датчиков	17
1.3. Некоторые физические эффекты, используемые в датчиках физических величин	24
Литература	28
Глава 2. Элементы общей теории измерительных преобразователей (датчиков)	31
2.1. Общие сведения	31
2.2. Обобщенный генераторный преобразователь	32
2.3. Метод электромеханических аналогий	34
Литература	41
Глава 3. Характеристики датчиков	42
3.1. Общие сведения	42
3.2. Статические характеристики	42
3.3. Метрологические характеристики	47
3.4. Динамические характеристики	51
3.5. Типовые динамические звенья	57
Литература	58
Глава 4. Электронные устройства датчиков	59
4.1. Общие сведения	59
4.2. Операционный усилитель	59
4.3. Усилители заряда	70
4.4. Аналогово-цифровые преобразователи	77
4.5. Генераторы сигналов	83
Литература	88
Глава 5. Упругие элементы датчиков	89
5.1. Основные разновидности и расчетные соотношения	89
5.2. Материалы упругих элементов	95
5.3. Статические и динамические характеристики упругих элементов	98
Литература	103
Глава 6. Оптические элементы датчиков	104
6.1. Общие сведения	104
6.2. Элементы геометрической оптики	106
6.3. Фотометрия	113
6.4. Источники оптического излучения	115
6.5. Оптические материалы	124
6.6. Линзы	124
6.7. Свето пропускающие окна	126
6.8. Плоские и сферические зеркала	126
6.9. Волоконные световоды	127
6.10. Покрытия, поглощающие тепловое излучение	129
Литература	130

Глава 7. Резистивные датчики	131
7.1. Основные характеристики	131
7.2. Реостатные датчики перемещений	135
7.3. Тензорезистивные датчики	139
7.4. Полупроводниковые тензодатчики	145
Литература	146
Глава 8. Емкостные датчики	147
8.1. Общие сведения	147
8.2. Емкостные датчики давления	150
8.3. Датчики уровня	155
8.4. Емкостный датчик перемещений (неровности поверхности)	161
8.5. Измерительные схемы емкостных датчиков	162
Литература	169
Глава 9. Пьезоэлектрические датчики	171
9.1. Общие сведения	171
9.2. Пьезоэлектрические материалы	174
9.3. Классификация пьезоэлектрических датчиков	181
9.4. Методы исследования пьезоэлектрических датчиков	182
9.5. Пьезоэлектрические резонаторы	183
9.6. Пьезокерамические трансформаторы	185
9.7. Пространственная энергосиловая структура пьезокерамического элемента	187
9.8. Обратная связь в пьезоэлектрических датчиках	190
9.9. Биморфные и триморфные пьезоэлементы	193
9.10. Резонансные пьезодатчики	196
9.11. Датчики на основе доменно-диссипативных пьезотрансформаторов	201
9.12. Электроакустические преобразователи	204
Литература	206
Глава 10. Электромагнитные преобразователи	208
10.1. Основные разновидности	208
10.2. Индуктивные преобразователи	209
10.3. Взаимоиндуктивные преобразователи	212
10.4. Индукционные преобразователи	215
10.5. Магнитоупругие и магнитоанизотропные преобразователи	217
10.6. Датчики Холла	221
10.7. Магниторезистивные преобразователи	225
10.8. Магнитодиоды	228
10.9. Магнитотранзисторы	229
Литература	231
Глава 11. Датчики температуры	232
11.1. Общие сведения	232
11.2. Терморезистивные преобразователи температуры	238
11.3. Термоэлектрические преобразователи температуры	246
11.4. Радиационные пирометры	253
11.5. Акустические термометры	257
11.6. Кварцевые термодатчики	261
Литература	262
Глава 12. Датчики и приборы для измерения механических величин	264
12.1. Силоизмерительные устройства	264
12.2. Датчики и приборы для измерения массы	269

12.3. Датчики давления и разницы давлений	273
12.4. Преобразователи крутящих моментов (торсиометры)	276
Литература	280
Глава 13. Датчики вибраций	281
13.1. Классификация датчиков вибрации	281
13.2. Механические приборы	281
13.3. Индукционные датчики	283
13.4. Индуктивные датчики	286
13.5. Тензометрические датчики	289
13.6. Емкостные датчики	290
13.7. Электронно-механические датчики перемещения	291
13.8. Фотоэлектрические датчики	292
13.9. Магнито-резистивные датчики	293
13.10. Пьезоэлектрические акселерометры	295
Литература	310
Глава 14. Гидроакустические преобразователи	312
14.1. Классификация и характеристики преобразователей	312
14.2. Соотношения электромеханического преобразования	314
14.3. Цилиндрические пьезокерамические преобразователи	316
14.4. Пластинчатые и сферические пьезокерамические преобразователи	317
14.5. Стержневые магнитострикционные преобразователи	318
14.6. Цилиндрические магнитострикционные преобразователи	322
14.7. Основные требования, предъявляемые к проектируемым преобразователям	326
14.8. Выбор способа преобразования энергии и формы колебаний	328
14.9. Некоторые конструкции преобразователей	330
Литература	333
Глава 15. Преобразователи для неразрушающего контроля	335
15.1. Классификация методов неразрушающего контроля	335
15.2. Магнитные методы	336
15.3. Электрические методы	338
15.4. Вихретоковые методы	339
15.5. Радиоволновые методы	340
15.6. Тепловые методы	340
15.7. Оптические методы	341
15.8. Радиационные методы	342
15.9. Неразрушающий контроль проникающими веществами	343
15.10. Акустические методы неразрушающего контроля	343
15.11. Пьезоэлектрические преобразователи для неразрушающего контроля	345
Литература	356
Глава 16. Датчики газоанализаторов	358
16.1. Тепловые газоанализаторы	359
16.2. Магнитные газоанализаторы	364
16.3. Оптические газоанализаторы	368
16.4. Фотоколориметрические газоанализаторы	378
16.5. Электрохимические газоанализаторы	380
16.6. Ионизационные газоанализаторы	383
16.7. Хроматографические газоанализаторы	387
16.8. Масс-спектрометрические газоанализаторы	391
16.9. Акустические газоанализаторы	394
Литература	395

Глава 17. Датчики влажности	397
17.1. Общие сведения	397
17.2. Методы измерения влажности твердых тел и жидкостей	397
17.3. Датчики электрических влагомеров твердых и жидких тел	402
17.4. Методы измерения влажности газов	407
Литература	416
Глава 18. Приемники излучения	417
18.1. Параметры и характеристики приемников оптического излучения	417
18.2. Приемники излучения на основе внутреннего фотоэффекта	423
18.3. Приемники излучения на основе внешнего фотоэффекта	444
18.4. Тепловые приемники оптического излучения	454
Литература	457
Глава 19. Детекторы ионизирующих излучений	458
19.1. Классификации детекторов	458
19.2. Ионизационные камеры	459
19.3. Газовые счетчики	460
19.4. Сцинтилляционные счетчики	464
19.5. Полупроводниковые детекторы	467
19.6. Интегрирующие детекторы для индивидуальной дозиметрии	471
Литература	474
Глава 20. Радиоволновые датчики	475
20.1. Общие сведения. Физические основы реализации радиоволновых датчиков	475
20.2. Датчики геометрических параметров	478
20.3. Датчики механических величин	485
20.4. Датчики параметров движения	489
20.5. Датчики физических свойств материалов и изделий	496
20.6. Контроль и измерение параметров некоторых объектов и процессов	502
Литература	513
Глава 21. Электрохимические и биохимические датчики	514
21.1. Классификации электрохимических датчиков	514
21.2. Характеристики электрохимических датчиков	516
21.3. Основные разновидности методов химического анализа	517
21.4. Кондуктометрические устройства	520
21.5. Измерительные преобразователи рН-метров	522
21.6. Ионометры	527
21.7. Электрохимические полевые транзисторы	530
21.8. Модифицированные электроды	531
Литература	532
Глава 22. Расходомеры и счетчики	533
22.1. Общие сведения	533
22.2. Расходомеры переменного перепада давления	535
22.3. Дифференциальные манометры	542
22.4. Поплавковые дифманометры	543
22.5. Колокольные дифманометры	544
22.6. Деформационные дифманометры	544
22.7. Расходомеры переменного уровня	545
22.8. Расходомеры обтекания	546
22.9. Тахометрические расходомеры	547
22.10. Шариковые расходомеры	548

22.11. Поршневые расходомеры	549
22.12. Тепловые расходомеры	550
22.13. Электромагнитные расходомеры	552
22.14. Акустические расходомеры	553
22.15. Лазерные расходомеры	556
22.16. Расходомеры, основанные на использовании явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР)	557
22.17. Центробежные расходомеры	559
22.18. Турборасходомеры	560
22.19. Кориолисовые и гироскопические расходомеры	560
Литература	562
Глава 23. Датчики охранной сигнализации	563
23.1. Состав систем охранной сигнализации	563
23.2. Типы датчиков, применяемых в системах охранной сигнализации	570
Литература	581
Глава 24. Датчики и приборы летательных аппаратов	582
24.1. Классификация и условия работы авиационных датчиков и приборов	582
24.2. Пилотажно-навигационные датчики и приборы летательных аппаратов	585
24.3. Технические характеристики типовых авиационных приборов и датчиков	607
Литература	615
Сведения об авторах	617

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга написана коллективом авторов: — Ишаниным Г.Г., Кошевым Н.Д., Минаевым И.Г., Полищуком Е.С., Совлуковым А.С., Шараповым В.М. — под общей редакцией В.М. Шарапова и Е.С. Полищука.

Авторы благодарны рецензенту д.т.н., профессору Тымчику Г.С. за полезные замечания, высказанные при обсуждении книги.

В книге изложены теоретические основы, принципы действия, описаны конструкции и характеристики датчиков физических величин. В конце каждой главы приведена обширная библиография, а также сайты предприятий-разработчиков и изготовителей.

В главе 1 вводятся основные понятия, обсуждаются термины и определения, приводятся классификации датчиков, а также описания некоторых физико-технических эффектов, используемых в датчиках.

В главах 2 и 3 приведены элементы общей теории датчиков, описан метод электромеханических аналогий, статические, динамические и метрологические характеристики датчиков, а также типовые динамические звенья.

В главах 4, 5, 6 описаны наиболее часто используемые для датчиков электронные устройства, а также упругие и оптические элементы датчиков.

В главах 7—10 описаны резистивные, емкостные, пьезоэлектрические и электромагнитные датчики, а в главах 11—19 — применение датчиков для измерения различных физических величин.

В главах 20—24 описаны электрохимические, биохимические и радиоволновые датчики, а также применение датчиков для измерения расхода и количества жидкостей, в охранной сигнализации, в летательных аппаратах.

Книга предназначена для научных работников, студентов, аспирантов, специалистов в области разработки датчиков, измерительных приборов, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.

Авторы благодарны Л.Г. Куницкой за помощь в оформлении книги.

Авторы благодарны также генеральному директору издательства «Техносфера» Казанцевой О.А. за помощь и поддержку авторов.

ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ ДАТЧИКОВ

Датчик — это преобразователь измеряемой (контролируемой) физической величины в величину, удобную для дальнейшего преобразования или измерения.

Датчик является обязательным элементом измерительных приборов, систем контроля и регулирования и т.п. Собственно, без датчиков невозможны ни измерение, ни контроль, ни регулирование.

Для построения датчиков используется значительное (более 500) количество физических эффектов (принципов). Некоторые из них приведены в табл. 1.1.

Развитие, совершенствование датчиков в значительной степени определяется достижениями в области физики, химии, физической химии, механики, радиотехники и других наук. Особое место в развитии датчиков занимают достижения и возможности современных технологий.

Принципы действия датчиков могут быть самыми разнообразными в зависимости от физической природы измеряемой величины, ее абсолютного значения, требуемой точности преобразования и т.п. Однако в подавляющем большинстве случаев преобразование входных физических величин в соответствующие выходные сигналы связано с *преобразованием энергии, в том числе преобразованием энергии одного вида в другой*. Энергетическое представление принципа работы измерительных преобразователей, базирующееся на двух фундаментальных законах — законе сохранения энергии и принципе обратимости, стало предпосылкой для создания А.А. Харкевичем основ общей теории измерительных преобразователей и их представления в виде пассивных четырехполюсников со сторонами разной физической природы [53].

Развитие общей теории измерительных преобразователей нашло отражение в работах Д.И. Агейкина, Л.А. Островского, А.М. Туричина, П.В. Новицкого и др.

Значительный вклад в развитие общих вопросов теории и практики датчиков отдельных физических величин внесли Д.И. Агейкин, Ж. Аш, Ф.Б. Байбаков, А.И. Бутурлин, В.И. Ваганов, В.А. Викторов, Дж. Вульвет, Г. Выглеб, А.Н. Гордов, З.Ю. Готра, Р. Джексон, В. Домаркас, Г.Г. Ишанин, П.П. Кремлевский, Л.Ф. Куликовский, Е.С. Левшина, Я. Луцик, В.В. Малов, Ф. Мейзда, И.Г. Минаев, П.В. Новицкий, Ю.Р. Носов, Г. Нуберт, П.П. Орнатский, Е.П. Осадчий, Л.А. Осипович, Е.С. Полищук, В.П. Преображенский, С.И. Пугачев, А.С. Совлуков, В.В. Солодовников, С.А. Спектор, Б.И. Стадник, С.Г. Таранов, Р. Тиль, Н.Г. Фарзани, Дж. Фрайден, А.В. Храмов, В.М. Шарапов, В. Эрлер, H.N. Norton, S. Thomson, R.W. White и др. (см. литературу к гл. 1).

1.1. Термины и определения

Как всегда, начиная изучать какой-либо вопрос, следует договориться о терминологии. Особое значение это приобретает в области, где существуют разные точки зрения, применяются различные термины для одного и того же технического устройства, существуют давние традиции и т.д.

Следует уточнить, что **определение** — это лингвистическая модель реального явления или объекта и, как всякая модель, является конечной, упрощенной и приближенной, содержит как истинную, так и условно-истинную и ложную информацию. Отсюда следует, что может существовать множество моделей (следовательно, и определений) одного и того же явления, объекта. То есть, каждое определение — это некая грань призмы, которой является исследуемое явление или объект.

В литературе достаточно широко используются термины «измерительное преобразование», «измерительный преобразователь», «датчик», «чувствительный элемент», «сенсор», «измерительный прибор», «средство измерений», а их определения — самые разнообразные. Например:

Преобразователями называют устройства, которые преобразуют одни физические величины, один вид энергии, один вид информации в другую физическую величину, в другой вид энергии или в другой вид информации [41, 43]. В широком смысле **преобразователь** — это, например, устройство, преобразующее давление в электрический сигнал (датчик давления), напряжение одного уровня в напряжение другого (трансформатор), электрическое напряжение во вращение вала (электродвигатель), энергию в движение (самолет, автомобиль) и т.д. Даже живой организм — это тоже своеобразный преобразователь.

Измерительное преобразование — представляет собой отражение размера одной физической величины размером другой физической величины, функционально с ней связанной [39, 40].

Измерительный преобразователь — это техническое устройство, построенное на определенном физическом принципе действия, выполняющее одно измерительное преобразование [39, 40].

Измерительный преобразователь — это преобразователь одной физической величины в другую, удобную для использования и обработки [18, 39].

Измерительное преобразование — это преобразование входного измерительного сигнала в функционально связанный с ним выходной сигнал.

Измерительный преобразователь (ИП) — это средство измерений, предназначенное для преобразования входного измерительного сигнала (измеряемой величины) в выходной сигнал, более удобный для дальнейшего преобразования, передачи, обработки или хранения, но непригодный для непосредственного восприятия наблюдателем [29].

Измерительный прибор является средством измерений, вырабатывающим выходной сигнал в форме, позволяющей наблюдателю непосредственно воспринять значение измеряемой физической величины [39].

Первичный измерительный преобразователь — это техническое устройство, которое непосредственно взаимодействует с материальным объектом измерения или контроля и предназначено для однозначного функционального преобразования одной физической величины — входной — в другую физическую

величину — выходную, которая является удобной для дальнейшего использования [54].

Объект — это явление или часть внешнего или внутреннего мира, которые наблюдает или может наблюдать человек в данный момент.

Материальный объект — это предмет материального исследования, сведения о котором нужны исследователю.

Объект измерения или контроля — это материальный объект или процесс, совокупность свойств которого определяет содержание ожидаемой информации. Объект измерения или контроля характеризуется измеряемыми физическими величинами или зависимостями между ними.

Чувствительный элемент (первичный чувствительный преобразователь) — конструктивный элемент или прибор, воспринимающий измеряемую физическую величину [60]. **Чувствительный элемент** является первичным измерительным преобразователем в измерительной цепи и осуществляет преобразование входного сигнала (измеряемой величины) в величину, удобную для последующей информационной обработки.

В различных областях техники чувствительный элемент называют **детектором, датчиком, приемником, зондом** или **измерительной головкой**.

Датчик — чувствительный элемент или конструктивно объединенная группа чувствительных элементов [60].

Детектор — чувствительный элемент (датчик) для измерения или регистрации излучения, полей или частиц [60].

Главным элементом измерительного преобразователя является **чувствительный элемент — сенсор**, который основывается на некотором физическом эффекте (принципе) [24, 39, 55, 61].

Принцип — лат. *principium* — основа, первоначало — основное исходное положение какой-либо теории, учение науки, основа устройства или действия какого-либо прибора, механизма и т.д. [29].

Сенсоры — от лат. *sensus* — чувство, ощущение — чувствительные искусственные устройства или органы живых организмов [29].

Датчик — это устройство, воспринимающее сигналы и внешние воздействия и реагирующие на них [49].

Датчик — совокупность измерительных преобразователей, объединенных в один конструктивный узел, выносимый на объект измерения [24].

В общем случае датчик может состоять из нескольких преобразователей [24, 39, 55, 60].

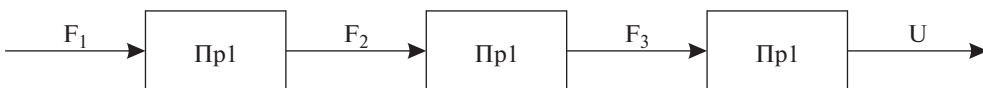


Рис. 1.1. Функциональная схема датчика: Пр1, Пр2, Пр3 — преобразователи; F_1 — входная физическая величина; F_2 , F_3 — промежуточные физические величины; U — выходной электрический сигнал

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 [50].

Датчик — устройство, непосредственно принимающее и передающее специальным приборам данные о деятельности механизма, живого организма или других явлениях [29].

Измерительный преобразователь является средством измерения и для него могут нормироваться технические и метрологические характеристики [39, 40].

Датчиком иногда называют средство измерений, представляющее собой конструктивно завершённое устройство, размещаемое в процессе измерения непосредственно в зоне исследуемого объекта и выполняющее функцию измерительного преобразователя [57].

В английском языке слово «sensor» означает «сенсор», «датчик», «чувствительный элемент».

Несмотря на почти полное совпадение смысла терминов «датчик» («сенсор», «чувствительный элемент») и «первичный преобразователь», между ними существуют также и некоторые смысловые и содержательные отличия. Датчик (сенсор, чувствительный элемент) **чувствует** (физическую величину), а преобразователь **преобразует** (в том числе и физическую величину).

Причем «чувствовать» в данном случае означает преобразовывать физическую величину к виду, удобному для дальнейшего использования или восприятия. Обычно это электрический сигнал, который легко преобразовать, например, в показания индикатора. Однако это может быть и неэлектрический сигнал, а изменение цвета (например, раствора или лакмусовой бумаги), которое может быть связано с наличием какого-то вещества в растворе или газе.

Понятие «преобразовывать» имеет, как мы уже отмечали, более широкий смысл.

Средство измерений — техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормируемые метрологические характеристики.

Измерительное устройство — средство измерений, в котором выполняется только одна из составляющих процедуры измерения (измерительная операция).

Измерительное преобразование (физической величины) — это измерительная операция, при которой входная физическая величина преобразуется в выходную, функционально связанную с ней.

Измерительный преобразователь — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Первичный измерительный преобразователь (сенсор, датчик) — измерительный преобразователь, ко входу которого подведена измеряемая величина, т.е. первый в измерительной цепи.

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Итак, оставляя в стороне некоторые лингвистические и семантические тонкости, а также очевидные неточности и противоречия в приведенных определениях, отметим, что анализ этих определений с функциональных и системных позиций показывает, что понятие **сенсор, датчик, чувствительный элемент, первичный измерительный преобразователь, детектор, приемник** в целом равнозначны.

1.2. Классификация датчиков

Классификация — операция отнесения заданного объекта к одному из классов, внутри которых объекты считаются неразличимыми. Классификация — это также результат этой операции [38, 58]. Классификация — простейший вид моделирования, в частности, самый слабый вид измерения [38, 58].

Классификация — это первичная, простейшая модель. Полнота классификации является предметом особого внимания при ее построении. Часто оказывается необходимым провести разграничение внутри одного класса, не отказываясь тем не менее от общности в его рамках. Так появляются подклассы, что приводит к многоуровневой, иерархической классификации.

Как и в случае лингвистических моделей, классификация, как и всякая модель, является конечной, упрощенной и приближенной, содержит истинную, условно-истинную и ложную информацию.

Отсюда также следует вывод, что может существовать (и существует) значительное количество классификаций преобразователей и датчиков по различным классификационным признакам. Например, в работе [55] приведена классификация датчиков по 24 классификационным признакам.

Задача классификации датчиков в первую очередь выдвигает требование установить целесообразные классификационные признаки [66]. Наиболее полное представление о всем разнообразии датчиков можно получить, приводя общую классификацию с учетом многих классификационных признаков (рис. 1.2).

Одна из самых общих классификаций делит датчики в зависимости от потребителя информации о них.

Для потребителей датчиков важна информация о датчиках, предназначенных для измерения определенных физических величин (ФВ), сведениях о выходных и входных параметрах и сигналах, технических и метрологических характеристиках. Такой подход требует построения классификационной схемы по видам физической величины.

Для разработчиков датчиков, студентов, специалистов, изучающих работу датчиков, важна информация о физических принципах их действия или, точнее, физических закономерностях, определяющих принцип их действия.

По видам входных и выходных величин измерительные преобразователи (датчики) можно разделить на 4 больших класса (рис. 1.3) [61]:

- **электрических величин в электрические**, например, непрерывных во времени (аналоговых) в прерывистые (дискретные, цифровые);
- **неэлектрических величин в неэлектрические**, например, давление в перемещение жесткого центра мембраны;
- **электрических величин в неэлектрические**, например, тока в отклонение стрелки прибора;
- **неэлектрических величин в электрические**. Примеры в данном случае мы приводить не будем, так как этим преобразователям (датчикам) посвящена почти вся эта книга.

Важнейшим классификационным признаком для датчиков является **физический принцип действия** — принцип преобразования физических величин, ко-

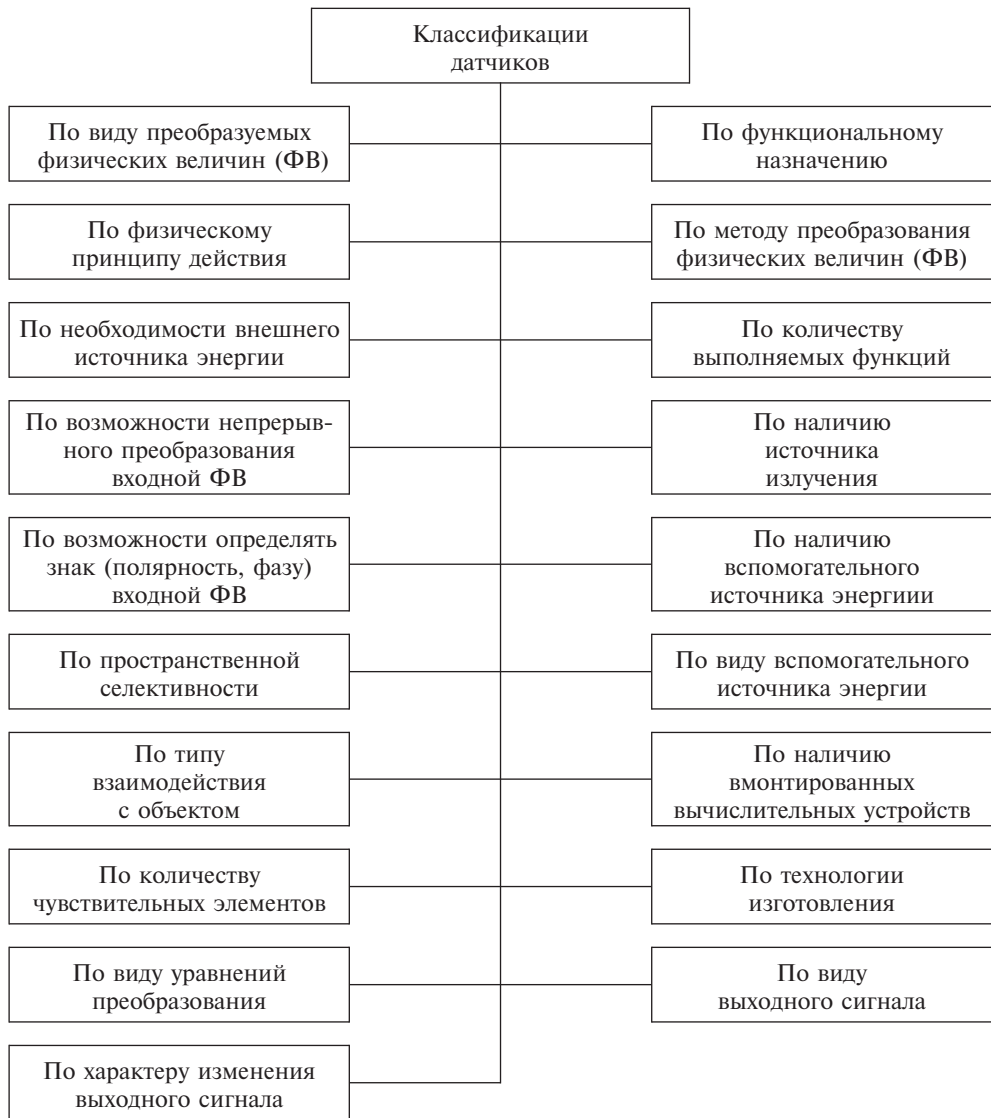


Рис. 1.2. Виды классификаций датчиков



Рис. 1.3. Классификация преобразователей по виду входных и выходных величин

торый основывается на некотором физико-техническом (физическом, электрохимическом, биоэлектронном, химическом и т.д.) эффекте (явлении). Такая классификация приведена на рис. 1.4.

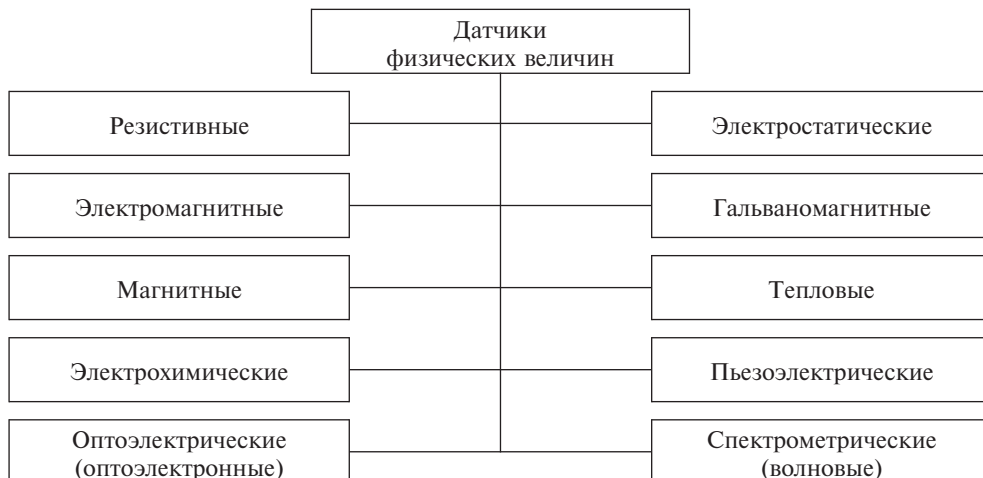


Рис. 1.4. Классификация датчиков по принципу действия

Кроме того, можно классифицировать датчики по виду измеряемых неэлектрических величин (рис. 1.5.) и электрических величин (рис. 1.6.).

По физическому принципу действия датчики (преобразователи) могут быть физическими (электрические, магнитные, тепловые, оптические, акустические и т.п.), химическими и комбинированными (физико-химические, электрохимические, биоэлектрические и т.п.). Принцип действия датчика определяется прежде всего тем, какая закономерность используется в нем. Однако существуют датчики, которые не относятся ни к одному из перечисленных классов, например, механоэлектрические. Эти датчики называются комбинированными.

По виду выходной величины и необходимости внешнего источника энергии датчики можно разделить на **генераторные** (активные), выходной величиной которых являются электрические величины (напряжение, заряд, ток, электродвижущая сила (ЭДС), и **параметрические** (пассивные), выходной величиной которых является сопротивление, индуктивность, емкость, диэлектрическая или магнитная проницаемость и т.п.

В **генераторных** датчиках внешний источник энергии не нужен. Например, в пьезоэлектрическом датчике под действием измеряемого усилия на электродах пьезоэлемента возникает электрический заряд (или электрическое напряжение).

В **параметрических** датчиках под действием измеряемой физической величины меняется какой-либо из параметров (например, электрическое сопротивление в тензорезисторах). Для получения выходного электрического сигнала требуется **источник энергии** (тока или напряжения). Таким образом, датчики могут иметь (или не иметь) вспомогательный источник энергии.

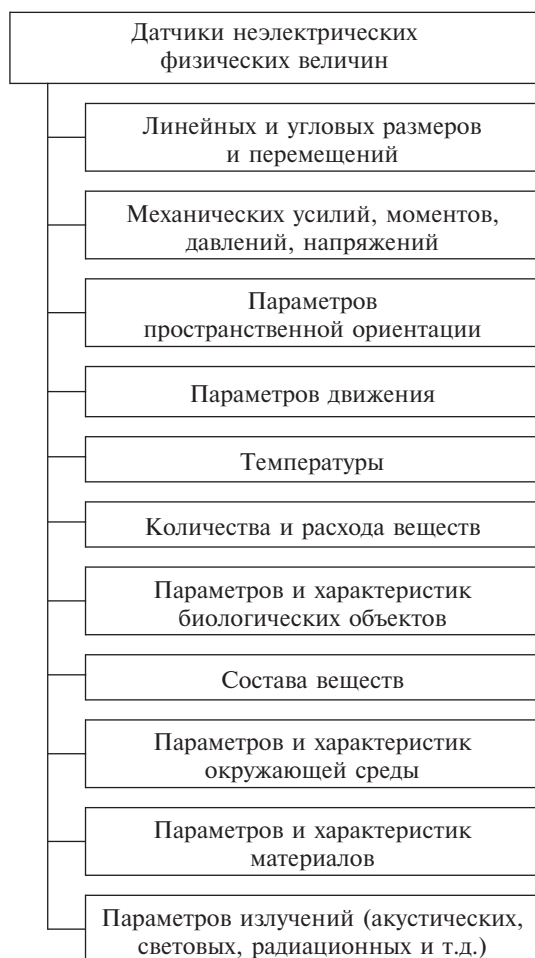


Рис. 1.5. Классификация датчиков по виду измеряемых неэлектрических величин



Рис. 1.6. Классификация датчиков по виду измеряемых электрических величин

Вспомогательные источники энергии в датчике могут быть электрическими, гидравлическими, пневматическими, механическими, оптическими и т.д. Таких источников в одном датчике может быть несколько.

По функциональному назначению датчики (преобразователи) можно разделить на:

- **индикаторные** (метрологические характеристики не нормируются). Датчик выдает информацию о наличии или отсутствии физической величины;
- **измерительные** (метрологические характеристики нормируются);
- **комбинированные**.

По методу преобразования физической величины датчики (преобразователи) делятся на (рис. 1.7):

- **датчики (преобразователи) прямого** одно- или многоступенчатого **преобразования**, в которых измеряемая физическая величина преобразуется в другую физическую величину — выходной сигнал датчика;
- **датчики (преобразователи) непрямого преобразования**, в которых измеряемая физическая величина преобразуется в промежуточную физическую величину, а уже затем эта величина преобразуется в выходной сигнал датчика;
- **датчики комбинированного типа**.



Рис. 1.7. Классификация видов преобразования физических величин

По характеру преобразования значений физической величины датчики делят на две группы:

- датчики непрерывного действия;
- датчики дискретного (циклического) действия.

По типу взаимодействия с объектом и количеству элементов датчики могут быть:

- стационарными или подвижными;
- контактными или бесконтактными;
- пространственно-распределенными (непрерывными, дискретными или многоэлементными);
- сосредоточенными (одноэлементными).

По пространственной селективности датчики делят на две группы:

- датчики направленного действия;
- датчики ненаправленного действия.

По наличию источника излучения датчики делятся на те, в которых такой источник есть (например, ионизационный датчик газоанализатора), и на те, в которых источников излучения нет.

Все большее распространение получают преобразователи с **вмонтированными электронными и вычислительными устройствами**, которые производят предварительную обработку выходного сигнала датчика. Такая обработка может включать **корректировку погрешностей датчика** в зависимости от влияющих факторов и т.д.

По виду уравнения преобразования датчики бывают с линейной и нелинейной зависимостью выходного сигнала от измеряемой физической величины.

По технологии изготовления датчики могут быть изготовлены с использованием объемного, печатного монтажа, гибридной и полупроводниковой технологии, микро- и нанотехнологий.

По способности различать изменение фазы или полярности входной физической величины датчики делят на фазочувствительные (реверсивные) и нефазочувствительные (нереверсивные), у которых выходной сигнал не зависит от полярности входной величины.

По характеру изменения выходного сигнала датчики делят на три группы:

- датчики с аналоговым выходным сигналом, который непрерывно изменяется;
- датчики с дискретным (например, импульсно изменяющимся) выходным сигналом.

Методы преобразования физических величин делятся на методы непосредственного преобразования, дифференциальный, замещения и нулевой (рис. 1.8).

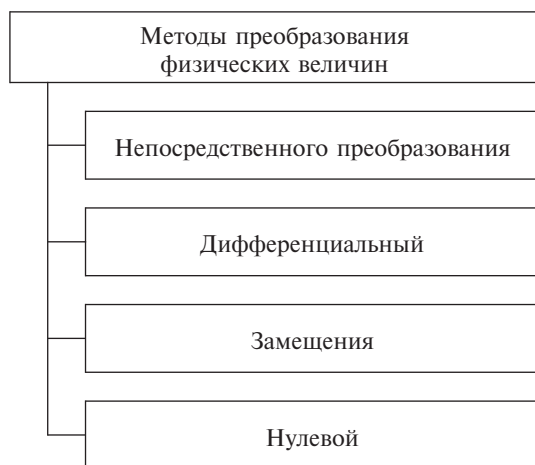


Рис. 1.8. Методы преобразования, используемые в датчиках

Дифференциальный метод, метод замещения и нулевой метод относятся к обобщенному методу сравнения [54, 59].

Все методы преобразования делятся также на методы **непосредственного преобразования** и **методы уравнивающего преобразования**.

Метод уравнивающего преобразования осуществляется в условиях, когда есть две цепи — прямого преобразования и **обратной связи**.

По характеру выполняемых в датчиках (преобразователях) **информационных преобразований** и способу получения выходных сигналов датчики можно разделить на несколько групп (рис. 1.9).

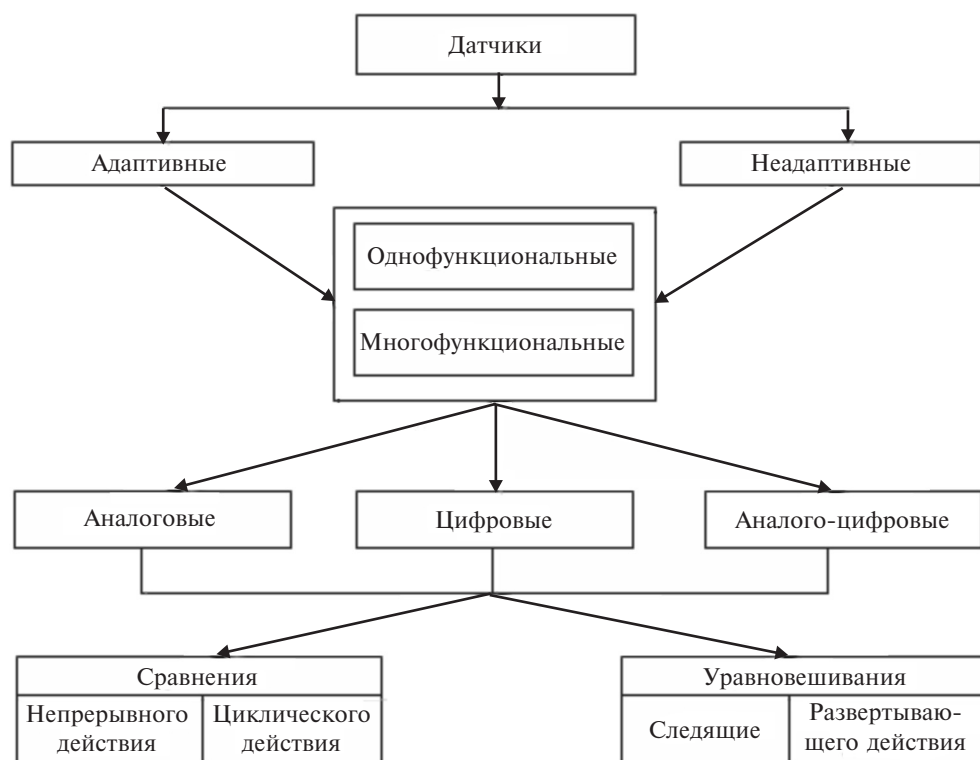


Рис. 1.9. Классификация датчиков по способу получения выходных сигналов и по характеру выполняемых в них информационных преобразований

По характеру адаптации к особенностям преобразования физических величин датчики делятся на адаптивные и неадаптивные, которые, в свою очередь, могут быть одно- и многофункциональные.

По виду выходной информации датчики (преобразователи) могут быть аналоговыми, дискретными (цифровыми) и аналого-цифровыми, при этом в датчиках могут осуществляться принципы сравнения или уравнивания.

Преобразователи, выполненные с использованием принципа сравнения, могут быть непрерывного или циклического действия.

Преобразователи, выполненные с использованием принципа уравновешивания, могут быть следящими или развертывающего действия.

Приведенные классификации датчиков, хотя и широко используются в измерительной технике и автоматическом управлении, не являются абсолютно корректными и окончательно завершенными, а характеризуют лишь наш уровень знаний в этой области.

1.3. Некоторые физические эффекты, используемые в датчиках физических величин

Основные физические эффекты, используемые в датчиках, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	Название эффекта	Краткое содержание эффекта
1	Акустический парамагнитный резонанс	Резонансное поглощение энергии ультразвуковой волны определенной частоты при ее прохождении сквозь парамагнитный кристалл, который находится в постоянном магнитном поле
2	Вентильный фотоэффект	Возникновение электродвижущей силы в системе, которая включает контакт двух разных полупроводников или полупроводника и металла, при поглощении оптического излучения
3	Вихревые токи (токи Фуко)	Возникновение замкнутых электрических токов в массивном электропроводнике при изменении интенсивности магнитного потока, который пересекает его
4	Гальваноупругий магнитный эффект	Изменение электрического сопротивления ферромагнетика, размещенного в магнитном поле, при воздействии одностороннего упругого напряжения растяжением или сжатием
5	Действие магнитного поля на контур с электрическим током	Вращение рамки с током под действием вращательного момента, который возникает при размещении рамки в однородном магнитном поле
6	Электротепловой эффект	Изменение температуры пирозлектрического кристалла под воздействием электрического поля
7	Электростатическая индукция	Возникновение на поверхности проводника или диэлектрика одинаковых и противоположных по знаку зарядов под действием внешнего электрического поля
8	Электромагнитная индукция	Возникновение электродвижущей силы индукции в электропроводящем контуре при изменении во времени магнитного потока через ограниченную контуром поверхность
9	Эффект Зеебека	В электрической цепи из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми имеют разные температуры, возникает электродвижущая сила
10	Эффект Томсона	В проводнике с током, вдоль которого имеется градиент температуры, выделяется или поглощается теплота (кроме выделения джоулевой теплоты)

Продолжение табл. 1.1

N п/п	Название эффекта	Краткое содержание эффекта
11	Эффект Пельтье	При протекании электрического тока через контакт разнородных металлов в нем выделяется или поглощается теплота
12	Эффект Холла	Между боковыми гранями пластины из металлического проводника или полупроводника, вдоль которого протекает электрический ток, при действии перпендикулярного магнитного поля возникает разность потенциалов
13	Электрострикция	Деформация диэлектрика под воздействием внешнего электрического поля, пропорциональная квадрату напряженности поля
14	Эффект Фарадея	Вращение плоскости поляризации линейно поляризуемого света, который распространяется в изотропном веществе вдоль постоянного магнитного поля, в котором находится это вещество
15	Эффект Нерста	Возникновение продольного градиента температуры в проводнике с током, который находится в магнитном поле
16	Эффект Нерста—Эттингсхаузена	Возникновение электрического поля в твердом проводнике при наличии градиента температуры и перпендикулярного к нему магнитного поля
17	Эффект Риги—Ледюка	Возникновение вторичной разности температур в проводнике с перепадом температуры, размещенном в магнитном поле перпендикулярно к тепловому потоку
18	Закон Кулона	Взаимодействие двух заряженных тел с силой, пропорциональной произведению их зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними
19	Закон всемирного тяготения	Действие на тело, которое находится в произвольной точке гравитационного поля, создаваемого массой тела, силы гравитации, которая зависит от массы этого тела, и напряженности гравитационного поля
20	Закон Ампера	Возникновение механической силы, которая действует на проводник с током, при перемещении проводника во внешнем магнитном поле
21	Закон Ома	Возникновение в проводнике электрического тока, плотность которого пропорциональна напряженности поля
22	Закон Био—Савара—Лапласа	При протекании по электропроводнику электрического тока вокруг него в пространстве возникает магнитное поле
23	Обратный пьезоэлектрический эффект	В анизотропных кристаллических диэлектриках под действием электрического поля возникает механическая деформация
24	Закон Джоуля—Ленца	В электропроводнике выделяется тепловая энергия, количество которой пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени протекания тока
25	Закон Фарадея	Количество вещества, которое выделяется или разлагается на электроде при электролизе, пропорционально количеству электричества (произведению силы тока на время электролиза), которое прошло через поверхность контакта электрода с раствором

Продолжение табл. 1.1

N п/п	Название эффекта	Краткое содержание эффекта
26	Зависимость Нерста равновесного потенциала электрода от концентрации вещества	Равновесный потенциал металлического электрода в растворе неорганического вещества пропорционален газовой постоянной, температуре и логарифму концентрации вещества и обратно пропорционален заряду иона и константе Фарадея
27	Зависимость электропроводности жидкого вещества от ее концентрации	Электропроводность жидкого вещества в определенном объеме пропорциональна площади электрода и удельной электропроводности вещества и обратно пропорциональна длине электрода
28	Зависимость температуры плавления твердого тела от внешнего давления	Изменение температуры плавления кристаллических веществ при увеличении внешнего давления. Если удельный объем жидкой фазы больше, чем твердой, то температура плавления увеличивается
29	Зависимость электрического сопротивления твердого тела от давления	Изменение электрического сопротивления твердого тела при изменении внешнего давления в области высоких температур. В большинстве веществ электрическое сопротивление уменьшается с увеличением давления
30	Зависимость показателя преломления газов от плотности	Увеличение показателя преломления газа с увеличением его плотности. Зависимость является квадратичной
31	Зависимость показателя преломления газов от давления	Увеличение показателя преломления газа при увеличении его давления. Зависимость в широком диапазоне изменений давления описывается полиномом некоторой степени
32	Зависимость модуля упругости металлов от температуры	Уменьшение модуля упругости металлов с увеличением температуры
33	Зависимость границы текучести металлов и сплавов от температуры	Уменьшение границы текучести металлов и сплавов с ростом температуры. Зависимость является близкой к экспоненциальной
34	Зависимость плотности металлов от температуры при переходе через точку плавления	Скачкообразное уменьшение плотности металлов с увеличением температуры вблизи температуры плавления
35	Звуколюминесценция	Свечение жидкости под действием интенсивной акустической волны (при акустической кавитации)

Продолжение табл. 1.1

N п/п	Название эффекта	Краткое содержание эффекта
36	Ионизация газа под действием электрического поля	Под действием сильного электрического поля атомы и молекулы газа превращаются в положительные и отрицательные ионы и свободные электроны
37	Ионизация газа рентгеновским излучением	Возникновение положительных и отрицательных ионов и свободных электронов в газе под действием электромагнитного излучения рентгеновского диапазона
38	Катодолюминесценция	Излучение света, который возникает при возбуждении люминофора электронным пучком
39	Магниторезистивный эффект	Изменение электрического сопротивления твердых проводников под действием магнитного поля
40	Магнитострикция	Изменение формы и размеров тела при его намагничивании
41	Магнитный гистерезис	Неоднозначная зависимость намагниченности ферромагнитного тела от напряженности внешнего магнитного поля. При циклическом изменении напряженности поля кривая изменения намагниченности имеет вид петли магнитного гистерезиса
42	Намагничивание тел	Возникновение или изменение намагниченности вещества при действии на него внешнего магнитного поля. Диамагнетики намагничиваются против поля, пара- и ферромагнетики — в направлении поля
43	Пьезоэлектрический эффект	Изменение поляризации некоторых кристаллических диэлектриков (пьезоэлектриков) при механической деформации
44	Пьезомагнитный эффект	Возникновение в веществе намагниченности под действием внешнего давления
45	Пироэлектрический эффект	Возникновение электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллических диэлектриков (пироэлектриков) при их нагревании или охлаждении
46	Поверхностный эффект	Переменный ток в электропроводнике неравномерно распределяется по площади его сечения. Неравномерность плотности тока увеличивается с увеличением частоты тока и площади сечения проводника
47	Поглощение звука	Уменьшение интенсивности акустической волны, которая проходит сквозь вещество, в результате необратимого перехода энергии волны в другие виды энергии, в частности, в теплоту
48	Поглощение света	Уменьшение интенсивности электромагнитного излучения при прохождении сквозь вещество
49	Поляризация диэлектриков	Возникновение объемного дипольного момента диэлектрика под действием электрического поля. На поверхности диэлектрика появляются связанные поляризуемые заряды
50	Сверхпроводимость	Скачкообразное уменьшение практически до нуля электрического сопротивления ряда металлических проводников и сильнолегированных полупроводников при охлаждении ниже критической температуры, характерной для данного материала

Продолжение табл. 1.1

№ п/п	Название эффекта	Краткое содержание эффекта
51	Сила Лоренца	Действие на заряженную частицу, которая движется в магнитном поле, силы, перпендикулярной к вектору магнитной индукции поля и вектору скорости движения частицы
52	Тензорезистивный эффект	Изменение электрического сопротивления в твердых электропроводниках под действием растягивающих или сжимающих напряжений
53	Тепловое расширение тел	Изменение размеров тела при его нагревании. Характеризуется коэффициентом линейного (для твердых тел) или объемного (для жидких и газообразных тел) теплового расширения
54	Термоэлектронная эмиссия	Излучение электронов нагретыми телами в вакуум или другую среду
55	Терморезистивный эффект	Изменение электрического сопротивления электропроводных тел при изменении их температуры. В металлических проводниках сопротивление растет с ростом температуры, в жидких электролитах и полупроводниках — уменьшается
56	Фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект)	Излучение электронов твердыми телами и жидкостями в вакуум или другую среду под действием электромагнитного излучения

Литература

1. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. — М.: Машиностроение, 1965. — 928 с.
2. Аш Ж и др. Датчики измерительных систем: Пер. с франц. / Под ред. А.С. Обухова. — М.: Мир. — Кн. 1, 1992. — 480 с., Кн. 2, 1992. — 460 с.
3. Байбаков Ф.Б., Шарапов В.М. Контроль примесей в сжатых газах. — М.: Химия, 1989. — 260 с.
4. Берлинер М.А. Измерения влажности. — М.: Энергия, 1973. — 400с.
5. Бутурлин А.И. Газочувствительные датчики на основе металлоксидных полупроводников //Зарубежная электронная техника. — 1983. — Вып. 10.
6. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей / Под ред. О.С. Арутюнова. — М.: Энергия, 1970. — 552 с.
8. Викторов В.А., Совлуков А.С. Радиоволновые датчики. — М.: Наука, 1983. — 314 с.
9. Вульвет Дж. Датчики в цифровых системах: Пер. с англ. / Под ред. А.С. Яромченко. — М.: Энергоиздат, 1981. — 200 с.
10. Выглеб Г. Датчики: Устройство и применение. — М.: Мир, 1989. — 196 с.
11. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.С. Основы температурных измерений. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 304 с.
12. Гордов А.Н., Стадник Б.И., Бычковский Р.В. и др. Приборы для измерения температуры: Справочник. — Львов: Наукова думка, 1986. — 348 с.
13. Гордов А.Н. Основы пирометрии. — М.: Металлургия, 1971. — 472 с.
14. Готра З.Ю., Ильницкий Л.Я., Полищук Е.С. и др. Датчики: Справочник / Под ред. З.Ю. Готры и О.И. Чайковского. — Львов: Каменяр, 1995. — 312 с.
15. Джексон Р. Новейшие датчики. — М.: Техносфера, 2006. — 620 с.

16. Домаркас В., Кажис Р. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. — Вильнюс: Минтис, 1975. — 258 с.
17. Дубовой Н.Д. Автоматические многофункциональные измерительные преобразователи. — М.: Радио и связь, 1989. — 256 с.
18. Зарипов М.Ф. Датчики малых угловых скоростей. — Уфа: Изд. Уфимского авиационного института, 1975.
19. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. — СПб: Папирус. 2003. — 527 с.
20. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. — М.: Радио и связь, 2006. — 96 с.
21. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1989. — 701 с.
22. Кремлевский П.П. и др. Расчет и конструирование расходомеров / Под ред. П.П. Кремлевского. — Л.: Машиностроение, 1978. — 224 с.
23. Куликовский Л.Ф., Жиров В.Г. Магнитомодуляционные измерительные преобразователи. — М.: Энергия, 1977. — 87 с.
24. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 320 с.
25. Луцик Я., Буняк Л., Стадник Б. Использование ультразвуковых сенсоров. — Львов: СП Бак, 1998. — 232 с. (На укр. яз.).
26. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 272 с.
27. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений. — М.: Мир, 1990. — 535 с.
28. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. — Л.: Энергия, 1968. — 248 с.
29. Новый словарь иностранных слов. — Минск: Современный литератор, 2005. — 1088 с.
30. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника, физические основы, приборы и устройства, — М.: Машиностроение, 1978. — 480 с.
31. Нуберт Г. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Введение в теорию, расчет и конструирование. — Л.: 1970. — 360 с.
32. Ожегов С.И. Словарь русского языка / Под ред. Н.Ю. Шведовой. — М.: Русский язык, 1978. — 846 с.
33. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. — Киев: Вища школа, 1983. — 455 с.
34. Осадчий Е.П. и др. Проектирование датчиков для измерения механических величин. — М.: Машиностроение, 1979. — 480 с.
35. Осипович Л.А. Датчики физических величин. — М.: Машиностроение, 1979. — 160 с.
36. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. — Л.: Энергия, 1971. — 544 с.
37. Павленко В.А. Газоанализаторы. — М.-Л.: Машиностроение, 1965. — 296 с.
38. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. — М.: Высшая школа, 1989. — 367 с.
39. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. — Киев: Вища школа, 1981. — 296 с.
40. Полищук Е.С., Дорожовец М.М., Стадник Б.И., Ивахив О.В., Бойко Т.Г., Ковальчик А. Средства и методы измерений неэлектрической величины: Учебник / Под ред. проф. Е.С. Полищука. — «Бескид-Бт», 2008. — 618 с. (На укр. яз).
41. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. — М.: Энергия, 1978. — 704 с.
42. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / Под ред. С.И. Пугачева. — Л.: Судостроение, 1984.

43. РМГ29-99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
44. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 320 с.
45. Таранов С.Г., Фахралева М.Е. Методы и средства измерения параметров магнитных полей. — Киев, 1985. — 392 с.
46. Телеников Ф.Е. и др. Теоретические основы информационной техники. — М.: Энергия, 1971. — 424 с.
47. Техническая кибернетика / Под ред. В.В. Солодовникова. Измерительные устройства, преобразующие элементы и устройства. — М.: Машиностроение, 1973. — 680 с.
48. Тиль Р. Электрические измерения неэлектрических величин: Пер. с нем. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 192 с.
49. Фарзани Н.Г. и др. Автоматические детекторы газов и жидкостей. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 96 с.
50. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник — М.: Техносфера, 2005. — 592 с.
51. Франко Р.Т. и др. Газоаналитические системы и приборы. М.: Машиностроение. — 218 с.
52. Харкевич А.А. Теория преобразователей. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948. — 188 с.
53. Харкевич А.А. Избранные труды. — М.: Наука, 1973. Т. 1 — 400 с.
54. Хомерики О.К. Гальваномагнитные элементы и устройства автоматики и вычислительной техники. — М.: Энергия, 1975. — 176 с.
55. Храмов А.В. Первичные измерительные преобразователи измерительных приборов и автоматических систем. — Киев, Вища школа, 1988. — 527 с. (На укр. яз.).
56. Sharapov V. Piezoceramic sensors. — Springer, 2011. — 498 p.
57. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
58. Шарапов В.М., Шарапова Е.В. Универсальные технологии управления. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
59. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезокерамические преобразователи физических величин. — Черкассы: ЧГТУ, 2005. — 496 с.
60. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков. Справочник: Пер. с нем. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 288 с.
61. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. П.В. Новицкого. — Изд. 5-е перераб. и доп. — Л.: Энергия, 1975. — 576 с.
62. Эрлер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами. — М.: Мир, 1974. — 286 с.
63. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. — М.: Машиностроение, 1989. — 360 с.
64. Norton, Handbook of Transducers. Prentice-Hall, Englewood cliffs, NJ, 1989.
65. Thomson, S. Control Systems: Engineering & Design. Longman Scientific & Technical, Essex, UK, 1989.
66. White, R.W. A sensor classification scheme. In.: Microsensors. IEEE Press, New York, 1991.

ГЛАВА 2

ЭЛЕМЕНТЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (ДАТЧИКОВ)

2.1. Общие сведения

Всякий измерительный прибор или устройство могут быть, представлены в виде цепи той или иной структуры, состоящей из ряда преобразователей, имеющих различное функциональное значение и принцип действия. Такие преобразователи могут быть предназначены как для преобразования одной физической величины в другую (аналоговые), так и для превращения непрерывных (аналоговых) величин в ряд дискретных — мгновенных или квантованных (округленных) — значений и наоборот.

Общая теория аналоговых преобразователей основывается на энергетических представлениях, устанавливающих связи между выражениями энергии, запасенной в системе, и возникающими в ней силами. В области измерительных преобразователей подобные представления получили широкое развитие в результате работ А.А. Харкевича, Л.А. Островского, Е. Г. Шрамкова и др. [3, 8]. Эти работы позволили осуществить наиболее общий подход к преобразователям физических величин как к обобщенным четырехполюсникам, причем теория распространяется только на обратимые преобразователи аналоговых величин, для которых справедлив принцип взаимности.

Обычно энергию любой системы по аналогии с механическими системами можно представить произведением двух величин, одной из которых является сила, а другой — перемещение (координата). Выбор физических величин, которые были бы эквивалентны механической силе и перемещению, в значительной степени условный, но их произведение должно соответствовать энергии как физической величине. В качестве обобщенных параметров можно принять также силу и скорость (производная перемещения во времени), произведение которых соответствует мощности как физической величине.

Для нахождения связи между силами и перемещениями движущейся системы тел широко используются уравнения Лагранжа второго рода. Эти уравнения дают возможность сравнительно легко решать задачи динамики связанных систем.

Полученные для механических систем уравнения Лагранжа используются и для других, немеханических систем. Так, они были использованы Д. Максвеллом для изучения электромагнитных явлений, В. Томсоном (лордом Кельвином) для изучения тепловых явлений, вследствие чего были созданы соответственно теоретические основы электродинамики и теоретические основы термодинамики.

В общем случае в уравнениях Лагранжа в качестве обобщенных координат могут быть приняты любые физические величины, которые определяют энергетическое состояние системы. Это дает возможность использовать уравнения Лагранжа для анализа работы измерительных преобразователей (ИП), входные и выходные величины которых могут быть величинами разной физической природы.

Таким образом, измерительный преобразователь (рис. 2.1), может описываться уравнениями Z-формы обобщенного пассивного четырехполюсника [3]:

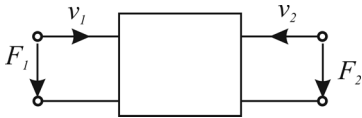


Рис. 2.1. Измерительный преобразователь как четырехполюсник

$$F_1 = Z_{11}v_1 + Z_{12}v_2; \quad (2.1)$$

$$F_2 = Z_{21}v_1 + Z_{22}v_2.$$

Сопротивления Z_{11} и Z_{22} определяются как отношения соответствующих обобщенных сил к обобщенным скоростям при условии отсутствия движения ($v = 0$, режим холостого хода) на противоположной стороне. В режиме холостого хода также определяются сопротивления Z_{12} и Z_{21} . Таким образом, значения всех этих сопротивлений не зависят от свойств последующих устройств, которые могут быть подключены к преобразователю, и характеризуют лишь свойства ИП. Поэтому сопротивления Z_{11} и Z_{22} называют собственными входным и выходным сопротивлениями преобразователя, а Z_{12} и Z_{21} — собственными взаимными (передаточными) сопротивлениями. Далее будет показано, что Z_{12} и Z_{21} имеют смысл коэффициентов преобразования.

При присоединении к выходу преобразователя некоторого обобщенного сопротивления Z_H входное сопротивление преобразователя определится как

$$Z_{ex} = \frac{F_1}{v_1} = Z_{11} + Z_{12} \frac{v_2}{v_1} = Z_{11} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_H + Z_{22}} = Z_{11} - \Delta Z, \quad (2.2)$$

поскольку, исходя из второго уравнения четырехполюсника при присоединенном Z_H (рис. 2.2.), отношение $\frac{v_2}{v_1} = -\frac{Z_{21}}{Z_H + Z_{22}}$ (здесь $Z_H = -\frac{F_2}{v_2}$ и по своей

физической сути является сопротивлением нагрузки; знак минус учитывает противоположность направлений выходной обобщенной силы и выходной обобщенной скорости в Z-форме уравнений четырехполюсника).

Из последнего выражения следует, что входное сопротивление ИП в общем отличается от его собственного входного сопротивления, т.е. сопротивления Z_{11} на значение так называемого внесенного сопротивления ΔZ , которое обратно пропорционально сумме собственного выходного сопротивления и сопротивления нагрузки.

2.2. Обобщенный генераторный преобразователь

Приведенные выше уравнения измерительного преобразователя как четырехполюсника касаются, как уже было сказано, преобразователей, для которых справедлив принцип обратимости. Такими являются генераторные преобразо-

ватели, которые вследствие действия входной величины генерируют на выходе определенный энергетический процесс. Исходя из Z -формы уравнений и учитывая выражение для входного сопротивления, эквивалентную схему генераторного преобразователя можно представить в виде, который изображен на рис. 2.2, где F_i — источник входной силы с внутренним сопротивлением Z_i .

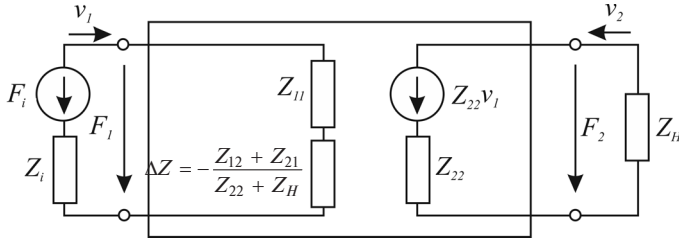


Рис. 2.2. Эквивалентная схема генераторного преобразователя

В зависимости от того, какие из входных и выходных параметров являются информативными, решая уравнение четырехполюсника, можно найти уравнение преобразования измерительного преобразователя и соответственно коэффициенты преобразования, выраженные через обобщенные сопротивления:

$$v_2 = k_1 F_1 = \frac{Z_{21}}{Z_{12} Z_{21} - Z_{11}(Z_H + Z_{22})} F_1, \quad (2.3)$$

$$F_2 = k_2 F_1 = \frac{Z_{21}}{Z_{11} + \frac{1}{Z_H}(Z_{11} Z_{22} - Z_{12} Z_{21})} F_1, \quad (2.4)$$

$$v_2 = k_3 v_1 = -\frac{Z_{21}}{Z_{22} + Z_H} v_1, \text{ или } F_2 = k_4 v_1 = \frac{Z_{21}}{1 + \frac{Z_{22}}{Z_H}} v_1. \quad (2.5)$$

Приведенные уравнения связывают входные и выходные параметры преобразователя в наиболее общем случае его работы с нагрузкой. Характеризировать работу ИП в первом приближении можно более простыми формулами. Действительно, режим работы ИП с выходным информативным параметром в виде обобщенной силы F_2 должен быть близким к холостому ходу $Z_H = \infty$, а режим работы ИП с информативным параметром в виде обобщенной скорости v_2 — близким к короткому замыканию ($Z_H = 0$). Тогда:

$$v_2 = \frac{Z_{21}}{Z_{12} Z_{21} - Z_{11} Z_{22}} F_1, \quad F_2 = \frac{Z_{21}}{Z_{11}} F_1; \quad (2.6)$$

$$v_2 = -\frac{Z_{21}}{Z_{22}} v_1, \quad F_2 = Z_{21} v_1. \quad (2.7)$$

Коэффициенты преобразования k_1, k_2, k_3 и k_4 для линейных преобразователей постоянны и независимы от аргументов v_1 и v_2 .

Коэффициенты Z_{ik} в приведенных выше уравнениях измерительных преобразователей являются операторными сопротивлениями и равны:

$$Z_{ik} = p^2 m_{ik} + p R_{ik} + W_{ik},$$

где m_{ik} , R_{ik} и W_{ik} — обобщенные параметры преобразователя, соответственно обобщенная масса, обобщенное активное сопротивление и обобщенная упругость.

Таким образом, выражая операторное сопротивление Z_{ik} через параметры преобразователя, можно перейти к дифференциальному уравнению преобразователя. В наиболее общем случае дифференциальное уравнение преобразователя в операторной форме с входной $X(t)$ величиной и выходной $Y(t)$ величиной (рис. 2.3) будет выглядеть как:

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0) Y(t) = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0) X(t). \quad (2.8)$$



Рис. 2.3. Измерительный преобразователь как структурный элемент

Простейшие ИП могут с достаточной точностью определяться дифференциальными уравнениями первого или второго порядков.

Уравнения измерительного преобразователя как четырехполюсника и его дифференциальные уравнения с обобщенными входными и выходными параметрами описывают работу обобщенного преобразователя. Используя эти уравнения для оценки работы реальных преобразователей тех или иных физических величин, применяют методы аналогий, которые основаны на аналогии между обобщенными силами, перемещениями, скоростями и сопротивлениями различной физической природы.

2.3. Метод электромеханических аналогий

Метод электромеханических аналогий является очень удобным средством исследования внутренней структуры преобразователей [3, 7].

Этот метод позволяет заменить уравнения движения данной механической системы соответствующими уравнениями для эквивалентной электрической цепи, что существенно упрощает задачу исследования. Таким путем определяются, например, частотные и переходные характеристики механических систем преобразователей различной конструкции и назначения, причем в большинстве случаев задача сводится к исследованию некоторого *эквивалентного колебательного контура*, свойства которого всесторонне изучены в теории электрических цепей.

Методом исследования, не требующим знания механизма системы, явились уравнения Лагранжа второго рода, причем в качестве обобщенных координат Максвелл выбрал количество электричества, а обобщенной скорости соответственно электрический ток, т.е.

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (2.9)$$

где q — количество электричества.

Если рассматривать обобщенную силу в качестве причины изменений в системе, то, как уже указывалось, она должна быть выбрана так, чтобы произведение силы на приращение обобщенной координаты равнялось произведенной работе. Такой силой при выбранных Максвеллом обобщенных координатах становится электродвижущая сила.

В начале своего развития теоретическая электротехника использовала математический аппарат теоретической механики [6].

В скором времени, однако, последовало развитие и совершенствование собственных методов электротехники. Наличие обильного количества готовых решений электротехнических задач привело впоследствии к обратному процессу, т.е. к перенесению более развитых методов электротехники на решение задач механики. Так возник метод электромеханических аналогий, основы которого вытекают из сравнения аналогичных по форме уравнений механических и электрических систем [2, 3, 7, 8].

Приведем для примера такие широко известные уравнения.

1. Уравнение электродвижущих сил для последовательного колебательного контура, находящегося под действием синусоидальной ЭДС,

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = E_m \sin \omega t, \quad (2.10)$$

где L , R и C — индуктивность, сопротивление и емкость контура соответственно.

Это же уравнение можно переписать, выразив все токи через количество электричества:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = E_m \sin \omega t. \quad (2.11)$$

подавляющее большинство электромеханических измерительных преобразователей представляет собой механические системы с одной степенью свободы. Имея почти всегда два разнородных накопителя энергии в виде массы и гибкости пружины, такие системы описываются дифференциальными уравнениями второго порядка и схематично могут быть изображены так, как это сделано для систем с поступательным и вращательным движением на рис. 2.4. Уравнения движения этих систем, как известно из теоретической механики, могут быть написаны в различных формах.

2. Уравнение поступательного движения массы, установленной на пружине, имеет вид:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + \frac{1}{C_x} x = F_m \sin \omega t, \quad (2.12)$$

где m , R и C_x — соответственно масса, механическое сопротивление поступательному движению и эластичность, или гибкость пружины.

Справа, как всегда, находится внешняя, синусоидально меняющаяся сила.

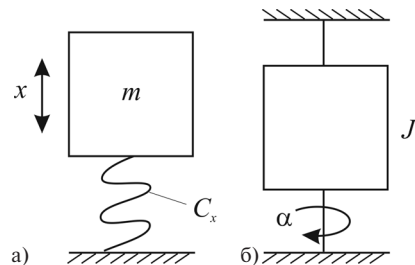


Рис. 2.4. Механические колебательные системы с поступательным (а) и вращательным (б) движением

3. Уравнение вращательного движения массы на упругом подвесе имеет совершенно аналогичную форму:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + \frac{1}{C_\alpha} \alpha = D_m \sin \omega t, \quad (2.13)$$

где J — момент инерции системы; P — коэффициент успокоения, который, как далее показано, оказывается механическим сопротивлением вращательному движению; C_α — эластичность растяжек или пружин.

Как правило, пользуются величиной, обратной эластичности, называемой удельным противодействующим моментом W , где

$$W = \frac{1}{C_\alpha}. \quad (2.14)$$

Угловое отклонение системы принято обозначать через α .

Приведенные уравнения аналогичны по форме, в результате чего аналогичны и их решения.

Не останавливаясь на решении этих уравнений, укажем, что во всех случаях достаточно просто можно найти отношение действующей силы к возникающей вследствие этого скорости, т. е. сопротивление.

Так можно получить модули полных сопротивлений:

а) для электрической цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}; \quad (2.15)$$

б) для механической системы с поступательным движением

$$Z_{m_x} = \sqrt{R_m^2 + \left(\omega m - \frac{1}{\omega C_x} \right)^2}; \quad (2.16)$$

в) для механической системы с вращательным движением

$$Z_{m_\alpha} = \sqrt{P^2 + \left(\omega J - \frac{W}{\omega} \right)^2}. \quad (2.17)$$

Сопоставление как исходных дифференциальных уравнений, так и выражений для полных сопротивлений приводит к возможности обоснования первой системы аналогий, представленной в виде сводки аналогов в табл. 2.1.

Рассмотрим теперь основные *принципы, используемые для построения эквивалентных электрических цепей при помощи метода аналогий*.

Система электромеханических аналогий позволяет строить схемы электрических цепей, эквивалентные механическим, при условии соблюдения определенных правил [3].

Для составления механических схем самих измерительных преобразователей пользуются представлениями об основных механических элементах или

механических двухполюсниках. Различают следующие основные механические элементы.

Таблица 2.1. Механические и электрические аналоги

Механические величины	Электрические аналоги
Линейное перемещение x } Угловое перемещение α }	Количество электричества q
Механическая скорость $\frac{dx}{dt}, \frac{d\alpha}{dt}$	
Действующая сила F или момент D	Электродвижущая сила E
Сила реакции системы F_x , момент M	Напряжение U
Полное механическое сопротивление	Полное электрическое сопротивление
Механическое сопротивление потерь	Активное сопротивление R
Масса m , момент инерции J	Индуктивность L
Эластичность, гибкость пружины	Электрическая емкость C
Упругость, удельный противодействующий момент	Величина, обратная емкости, т.е. $1/C$

Элементом массы считают систему, состоящую из конечной массы m и точки, связанной с бесконечно большой массой, служащей началом системы отсчета. В качестве такой бесконечно большой массы принимается масса Земли. Наличие связи с бесконечной массой вытекает из представления сил как некоторых натяжений, а это предусматривает по крайней мере два взаимодействующих тела.

Элемент массы условно изображают, например, так, как это показано на рис. 2.5, а.

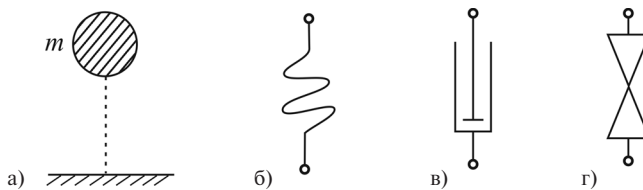


Рис. 2.5. Элементы механических систем: а — масса; б — упругость; в — элемент успокоения (трения); г — обобщенный механический элемент

Элементом упругости является идеализированный элемент, у которого любому относительному перемещению концов противодействует только упругая сила F_x или момент M , причем соблюдаются равенства:

где C_x — эластичность или гибкость элемента;

W — удельный противодействующий момент.

Элемент упругости изображается так, как показано на рис. 2.5, б.

Под **элементом успокоения** обычно понимают такой идеальный двухполюсник, у которого любое относительное перемещение концов связано с сопротивлением силы трения, пропорциональной скорости, т. е.

$$F_x = \frac{1}{C_x} x; M = W\alpha,$$

$$F_{\text{уен}} = R_m \frac{dx}{dt}$$

или

$$M_{\text{уен}} = P \frac{d\alpha}{dt}.$$

В обоих случаях направление силы (момента) и перемещения противоположны. Элемент успокоения изображен на рис. 2.5, в.

На схемах любой механический элемент, если он представляется обобщенно, а не конкретно, часто изображается так, как показано на рис. 2.5, г.

Механические элементы могут соединяться друг с другом по-разному, причем простейшими соединениями являются соединения цепочкой (рис. 2.6, а) или узлом (рис. 2.6, б).

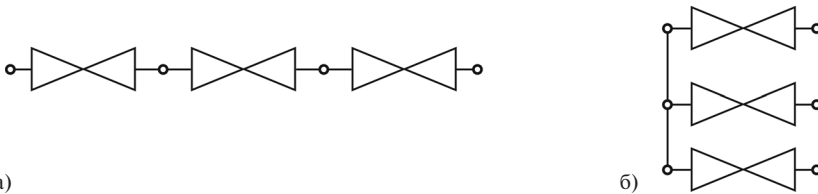


Рис. 2.6. Соединение элементов цепочкой (а) и узлом (б)

Из определения механических элементов и указанных способов их простейших соединений вытекают такие основные следствия.

Соединение элементов цепочкой. При соединении элементов цепочкой справедливы следующие условия:

1. Относительное перемещение концов цепочки равно сумме относительных перемещений концов каждого из элементов.
2. Относительная скорость концов цепочки равна сумме относительных скоростей концов элементов.

Если сопоставить это правило с законом распределения токов в электрической цепи, станет ясно, что соединение цепочкой соответствует не последовательному, а параллельному соединению, так как только при параллельном соединении токи складываются.

Из условия равновесия всей системы сила, действующая на каждый элемент цепочки, равна приложенной силе. Последнее условие соответствует электродвижущей силе, приложенной к элементам электрической цепи, соединенным параллельно.

Таким образом, соединение механических элементов цепочкой соответствует параллельному соединению элементов электрической цепи. Отсюда также следует, что податливость механической системы, т. е. величина, обратная механическому сопротивлению, равна сумме податливостей отдельных элементов.

Соединение элементов в узлы. Предполагая соединение концов абсолютно жестким, легко прийти к следующим выводам:

1. Относительное перемещение узлов, как это видно из рис. 2.6, б, равно относительному перемещению концов каждого элемента.

2. В соответствии с этим относительная скорость узла равна относительной скорости концов скрепленных элементов. Такое равенство скоростей характерно не для параллельного, а для последовательного соединения элементов электрической цепи, так как при этом токи в каждом из элементов одинаковы.

3. Сумма реакций всех элементов узла равна приложенной внешней силе. В электрической цепи этому соответствует сумма падений напряжений на последовательно включенных элементах.

Перечисленные свойства показывают, что соединение механических элементов в узлы соответствует последовательному соединению элементов электрической цепи. Если же говорить о механическом сопротивлении такой системы, то оно равно сумме сопротивлений отдельных элементов.

Основные примеры аналогий между механическими и электрическими цепями приведены в табл. 2.2, где для вращательного движения специальных обозначений не предусмотрено.

Нужно отметить то обстоятельство, что всякая реальная механическая система в действительности всегда является системой с распределенными постоянными. Рассмотрение подобных систем при помощи эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами является приближением, степень и допустимость которого зависят от конкретных условий задачи. Здесь под приближением понимается сохранение в эквивалентной системе некоторого числа свойств реальной системы. Чем большее число свойств требуется сохранить, тем сильнее усложняется эквивалентная схема и тем труднее становится ее исследование.

По этой причине всегда важно суметь выделить главные свойства, чтобы разумно пожертвовать второстепенными. Методы исследования механических систем с распределенными постоянными при помощи аналогий подробно рассматриваются в электроакустике [2, 3, 7, 8].

Следует отметить, что соответствующие аналогии построены для электромагнитных электротепловых цепей и устройств [1, 3, 8].

Обобщенные параметры и их аналогии в цепях разной природы приведены в табл. 2.3.

В табл. 2.3 использованы следующие обозначения: ρ — удельное электрическое сопротивление; ρ_μ — удельное магнитное сопротивление; ρ_m — плотность тела; l и S — длина и площадь поперечного сечения цепи соответствующей физической природы; w — количество витков; $F_{Tp} = P_H S_{Tp}$ (тут P_H — давление, нормальное к поверхности трения S_{Tp}); k_{Tp} — коэффициент трения; $e_\mu = d\Phi / dt$ — удельная ЭДС, то есть ЭДС, которая наводится в одном витке; ε_0 — электрическая постоянная; μ_0 — магнитная постоянная; Q — тепловая энергия системы (количество теплоты); C_Q — удельная теплоемкость, ε и μ — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости.

Таблица 2.2. Аналогии механических и электрических цепей

Механическая цепь	Электрический аналог

Таблица 2.3. Обобщенные параметры и их аналогии в цепях разной природы

Обобщенный параметр	Природа цепи			
	Механическая	Электрическая	Магнитная	Тепловая
Обобщенная сила	F [Н] сила	U [В] напряжение	$F_\mu = I w$ [А] магнитодвижущая сила	ΔT [К] разность температур
Обобщенная координата	x [м] перемещение	q [Кл], [А с] заряд	F [Вб], [В с] магнитный поток	$S_Q = Q/T_{cp}$ [Дж/К] энтропия
Обобщенная скорость	$v = dx/dt$ [м/с] скорость	$I = dq/dt$ [А] ток	$e_\mu = d\Phi/dt$ [В] скорость изменения магнитного потока (ЭДС)	$v_Q = dS_Q/dt$ [Вт/К] скорость изменения энтропии
Обобщенное сопротивление	$R_{тр} = k_{тр} F_{тр}$ [Н с/м] сопротивление трения	$R = \rho \frac{l}{S}$ [Ом] активное сопротивление	$R_\mu = \rho_\mu \frac{l}{S}$ [См] активная составляющая магнитного сопротивления	$R_T = T_{cp}/\lambda_T S$ [К ² /Вт] тепловое сопротивление
Обобщенная масса (индуктивность)	$m = \rho_m l S$ [кг] масса	$L = \omega^2 \mu_0 \frac{S}{l}$ [Гн] индуктивность (контур)	$L_\mu = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{l}$ [Ф] магнитная индуктивность	—
Обобщенная эластичность (емкость)	$C_H = x/F$ [м/Н] эластичность	$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{l}$ [Ф] емкость	$C_\mu = \mu \mu_0 \frac{S}{l}$ [Гн] магнитная емкость	$C_T = m C_Q/T_{cp}$ [Дж/К ²] тепловая емкость

Литература

1. Зарипов М.Ф., Петрова Н.Ю. Проблемы информационной базы систем управления. Уфа: Башкирский филиал АН СССР, 1979.
2. Ольсон Г. Динамические аналогии. — М.: Изд. ин. лит., 1947.
3. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. — Л.: Энергия, 1971. — 544 с.
4. Гаврилюк М.А., Полищук Е.С., Обозовский С.С. и др. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин / Под ред. Е.С.Полищук. — Киев: Вища школа, 1984. — 360 с.
5. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. — Киев: Вища школа, 1981. — 296 с.
6. Савин Г.Н., Путьята Т.В., Фрадлин Б.Н. Курс теоретической механики. — Киев: Вища школа, 1973. — 360 с.
7. Фурдуев В.В. Электроакустика — М.: Гостехиздат, 1948.
8. Харкевич А.А. Избранные труды. — М.: Наука, 1973. Т. 1. — 400 с.

ГЛАВА 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

3.1. Общие сведения

Характеристика (от греч. — черта, особенность) — определение и описание отличительных свойств, достоинств и недостатков чего-либо (или кого-либо).

Характеристики датчиков, как и других средств измерений, делятся на две группы — преобразовательные и метрологические.

Технические (преобразовательные) характеристики — это характеристики, устанавливающие связь между входной и выходной величинами. К ним относятся функции преобразования (градуировочные характеристики), коэффициенты преобразования, чувствительность, диапазон преобразования, порог чувствительности.

Метрологические характеристики — характеристики датчиков, нормирующие точностные параметры (погрешности) средств измерения.

В зависимости от режима работы как технические, так и метрологические характеристики делятся на статические и динамические. Статические характеристики соответствуют статическому режиму работы датчика, при котором преобразуемая (измеряемая) величина не зависит от времени. Динамическими называют характеристики, которые проявляются при работе датчика (преобразователя) в динамическом режиме, т.е. когда преобразуемая величина является функцией времени.

3.2. Статические характеристики

Функция преобразования. Эта характеристика устанавливает связь между входной x и выходной y величиной датчика (преобразователя).

$$y = f(x) \quad (3.1)$$

Как правило, выходная величина зависит не только от входной (измеряемой) величины, но и от некоторых других величин (влияющих факторов) — например, температуры окружающей среды, давления, вибрации, напряжения источника питания и т.п.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.2)$$

Однако во многих случаях функция преобразования является одномерной, т.е. связывает выходную величину (сигнал) преобразователя только с одной входной.

Эта характеристика может быть как линейной, так и нелинейной (например, логарифмической, экспоненциальной, степенной и т.п.).

Одномерная линейная функция, как известно, имеет вид

$$y = a + S_x x, \quad (3.3)$$

где a — постоянная составляющая (т.е. значение выходного сигнала при нулевом входном воздействии); S_x — тангенс угла наклона прямой.

Логарифмическая функция преобразования описывается зависимостью

$$y = a + s \ln x, \quad (3.4)$$

экспоненциальная

$$y = ae^{sx}, \quad (3.5)$$

степенная

$$y = a + bx^k, \quad (3.6)$$

где b, k — постоянные числа.

Во многих случаях нелинейные преобразователи могут считаться линейными внутри ограниченного диапазона значений входной величины. Для более широкого диапазона значений нелинейная функция преобразования представляется в виде отрезков нескольких прямых линий. Эта процедура называется **кусочно-линейной аппроксимацией**.

В общем случае функции преобразования отдельных однотипных преобразователей (датчиков) из-за наличия индивидуальных особенностей будут несколько отличаться друг от друга, т.е. каждый отдельный преобразователь может характеризоваться своей индивидуальной функцией преобразования.

В качестве обобщенной характеристики преобразователей данного типа принимается некоторая усредненная по результатам многократных измерений или для большой группы однотипных преобразователей функция преобразования.

Определение этой функции преобразования может производиться в определенных точках диапазона преобразования как в нормальных условиях, так и при воздействии внешних факторов, оговоренных в нормативных документах на данный тип преобразователя (датчика) [1, 5, 7, 9].

Преобразователю присваивают либо определенную таким образом усредненную функцию преобразования, либо некоторую математическую функцию, которая является наилучшим приближением к ней. Присвоенную преобразователю функцию называют **номинальной (паспортной) статической функцией преобразования, или градуировочной характеристикой**.

Она может быть записана аналитически, а также представлена в виде таблицы или графика [4, 5].

В некоторых иностранных источниках функцию преобразования называют передаточной функцией. В отечественной литературе **передаточной функцией** называют отношение изображений по Лапласу выходной и входной величины при нулевых начальных условиях [2].

Коэффициент преобразования. В гл. 2 было показано, что коэффициент преобразования зависит не только от типа преобразователя, но и для данного преобразователя определяется также рабочим режимом сторон, причем возможны различные комбинации режимов холостого хода и короткого замыкания на обеих сторонах, дающие четыре разных выражения для коэффициента преобразования.

В том случае, когда аргументами в уравнениях преобразователей оказываются обобщенные скорости (токи), коэффициент преобразования имеет смысл взаимного сопротивления, т.е. $K_o = Z_{12} = Z_{21}$ [4].

Во многих случаях используют коэффициент преобразования, измеренный при холостом ходе на обеих сторонах

$$K_o = \frac{F_1}{F_2} \Big|_{v_1=0}, \quad (3.7)$$

где F_1, F_2 — соответственно обобщенные силы на входе и выходе преобразователя; v_1 — обобщенная скорость на входе преобразователя.

На практике пользуются следующим выражением для определения коэффициента преобразования [5]:

$$K_o(x) = \frac{y}{x} = \frac{f(x)}{x}, \quad (3.8)$$

где x — входная величина; y — выходная величина.

Номинальный коэффициент преобразования определяется по номинальной функции преобразования как

$$K_{ном}(x) = \frac{f_{ном}(x)}{x}. \quad (3.9)$$

Следует отметить, что $K_{ном}(x) = \text{const}$ только тогда, когда номинальная функция преобразования линейна и ее график проходит через начало координат.

В общем случае величины x и y являются величинами различной физической природы. С помощью номинального коэффициента преобразования выходная величина y может быть приведена ко входу преобразователя, в результате чего можно получить приведенную функцию преобразования

$$x = \frac{y}{K_{ном}(x)}. \quad (3.10)$$

Чувствительность преобразователя. Чувствительность преобразователя — это производная от функции преобразования по входной величине

$$S = \frac{dy}{dx}, \quad (3.11)$$

или в конечных приращениях

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (3.12)$$

Другими словами, чувствительность преобразователя — это отношение изменения выходной величины к изменению входной величины, вызвавшему это изменение выходной величины.

Для преобразователей, функция преобразования которых линейна, чувствительность будет постоянной. Если график функции преобразования прохо-

дит через начало координат, чувствительность равна коэффициенту преобразования.

Если функция преобразования нелинейна, то чувствительность является функцией входной величины и связана с коэффициентом преобразования зависимостью [5]:

$$S(x) = \frac{dy}{dx} = \frac{d[k(x)x]}{dx} = k(x) + \frac{dk(x)}{dx}x. \quad (3.13)$$

Это означает, что коэффициент преобразования является более информативной характеристикой преобразователя, чем чувствительность.

Так как чувствительность зависит от коэффициента преобразования, в документации на преобразователь необходимо оговаривать условия ее определения.

Для характеристики нелинейных преобразователей часто пользуются понятием *средней чувствительности* в диапазоне преобразователя [1]:

$$S_{cp} = \frac{y_k - y_n}{x_k - x_n}, \quad (3.14)$$

где $y_k - y_n$ и $x_k - x_n$ — *диапазоны преобразования* соответственно по выходной и входной величинам; y_k, x_k, y_n, x_n — конечные и начальные пределы измерений.

Под *относительной чувствительностью* понимают отношение относительного изменения выходной величины к относительному изменению входной величины

$$S_{отн} = \frac{\Delta y / y}{\Delta x / x}. \quad (3.15)$$

Если входная величина является функцией времени, то определенной функцией времени будет и чувствительность. Таким образом, при гармоническом характере изменения входной величины и установившемся режиме работы преобразователя нужно говорить о *комплексной чувствительности* $S(j\omega)$.

В соответствии с этим при изучении переходных процессов естественно пользоваться понятием переходной чувствительности $S(t)$.

Наконец, наиболее общей формой чувствительности является *операторная чувствительность* $S(p)$.

В теории автоматического регулирования эта чувствительность называется *передаточной функцией* [2, 4].

Последние характеристики являются функциями времени, т.е. являются динамическими характеристиками и будут рассмотрены в разд. 3.4.

Чувствительность преобразователя, состоящего из нескольких последовательно включенных промежуточных преобразователей (звеньев),

$$S = S_1 \cdot S_2 \dots S_n. \quad (3.16)$$

Порог чувствительности. Под порогом чувствительности понимают наименьшее значение входной величины, которое может быть уверенно выявлено данным преобразователем.

В оптических измерениях порог чувствительности часто называют «разрешающей способностью» [4].

Диапазон преобразования. Разность между максимальным и минимальным значением входной (преобразуемой) физической величины называется диапазоном преобразования входной величины

$$D_x = x_k - x_n, \tag{3.17}$$

где x_k, x_n — соответственно максимальное (конечное) и минимальное (начальное) значения входной величины.

Аналогично диапазон преобразования по выходной величине

$$D_y = y_k - y_n, \tag{3.18}$$

где y_k, y_n — соответственно максимальное (конечное) и минимальное (начальное) значения выходной величины.

Сопrotивление преобразователя. В гл. 2 мы уже отмечали, что сопротивление является важным фактором, характеризующим преобразователь.

Сопrotивление — это отношение обобщенной силы к обусловленной ею обобщенной скорости (для электротехники — это соответственно электрические напряжения и ток). Сопrotивление характеризует потери энергии в системе.

Сопrotивление может быть активным, реактивным, комплексным.

Для преобразователя можно говорить о входном и выходном сопротивлении, а также о переходном, динамическом и др. (см. гл. 2).

Гистерезис — это запаздывание изменения физической характеристики вещества от вызывающей его изменения физической величины, например, магнитный гистерезис — отставание состояния намагниченности ферромагнетика от изменения напряженности внешнего магнитного поля. Упругий гистерезис — отставание изменения деформации тела от изменения механического напряжения.

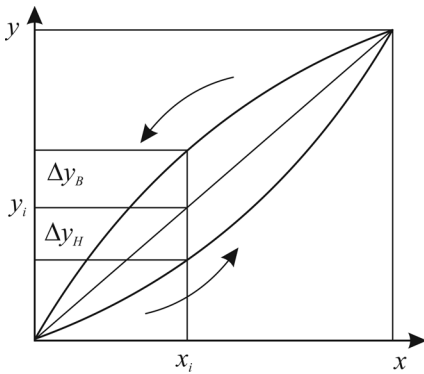


Рис. 3.1. Функция преобразования с гистерезисом: Δy — погрешность от гистерезиса

Для измерительных преобразователей наличие гистерезиса является причиной дополнительной погрешности как разности Δy значений выходной величины y при возрастании («прямой ход») и убывании («обратный ход») входной величины x и номинальным значением y (рис. 3.1).

Типичной причиной возникновения гистерезиса являются трение и структурные изменения в материалах.

Нелинейность. Нелинейность определяется для преобразователей, функцию преобразования которых можно аппроксимировать прямой линией. Под **нелинейностью** понимается максимальное отклонение реальной функции преобразования от аппроксимирующей прямой линии [1, 5].

Нелинейность обычно выражается либо в процентах от максимального значения выходной величины, либо в единицах этой величины.

Здесь уместно отметить, что известны различные методы линеаризации нелинейной функции преобразования. Один из способов — проведение прямой через конечные точки функции преобразования [6]. Второй способ основан на применении метода наименьших квадратов, суть которого изложена, например, в [1].

Еще один способ — метод наилучшей прямой — заключается в нахождении линии, проходящей посередине между двумя параллельными прямыми, расположенными как можно ближе друг к другу и охватывающими все выходные значения реальной функции преобразования [6].

Воспроизводимость. Воспроизводимость — это способность преобразователя при одинаковых условиях выдавать одинаковые результаты. Воспроизводимость можно оценить или по максимальной разности значений выходной величины, или по величине среднеквадратического отклонения [1].

Надежность. Под надежностью понимают свойства объекта (в частности, датчика, преобразователя) сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения.

Надежность характеризует поведение датчика (преобразователя) во времени и является обобщенным понятием, включающим в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 [10] **безотказность** — это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени, при этом не допускаются отказы. Под **отказом** объекта понимается невыполнение каких-либо функций или режимов, оговоренных в технической документации. Безотказность характеризуется вероятностью безотказной работы или наработкой на отказ.

Долговечность — это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния, при котором он не способен выполнять все или одну из своих функций, в том числе не обеспечивать выполнение каких-либо параметров в заданных пределах.

3.3. Метрологические характеристики

Точность измерения. Конечной целью измерения является нахождение результата измерения как оценки истинного значения измеряемой величины. Качественной характеристикой измерения является **точность измерения**, которая характеризует близость результата измерения к действительному (истинному) значению измеряемой величины. Чем ближе результат измерения к истинному значению, тем точнее измерения. И наоборот.

Традиционно для количественного оценивания качества измерений используют негативную характеристику — погрешность измерения [1].

Погрешность измерения — отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины [1].

Погрешности датчиков (преобразователей), как и погрешности других средств измерений, могут быть классифицированы по различным признакам.

По способу выражения погрешности подразделяют на абсолютные, относительные и приведенные.

Приведенное выше определение погрешности измерения как отклонение результата измерения x от истинного (действительного) значения x_0 измеряемой величины

$$\Delta = x - x_0, \quad (3.19)$$

есть собственно определение **абсолютной погрешности**. Особенностью определения абсолютной погрешности датчиков (преобразователей) является то, что за истинное значение физической величины (входной или выходной) принимается значение этой величины на номинальной статической функции преобразования (градуировочной характеристике).

Абсолютная погрешность не дает полного представления о качестве измерений. Например, абсолютная погрешность 0,1 кг при измерении массы $m = 100$ кг — это вполне хороший результат. Но абсолютная погрешность 0,1 кг при измерении массы $m = 1$ кг — это очень низкая точность измерения.

Для количественной характеристики качества измерений в этом случае удобнее использовать относительную погрешность

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} \approx \frac{\Delta}{x} \quad (3.20)$$

Часто эту величину выражают в процентах ($\delta\% = \delta \cdot 100\%$) или в так называемых промилле **ppm** (одна миллионная часть) — $\delta_{ppm} = \delta \cdot 10^{-6}$. При этом справедливо соотношение

$$1_{ppm} = 0,0001\% = 10^{-6}.$$

Неопределенность результата измерения

Поскольку при измерении физической величины ее истинное значение остается неизвестным, то невозможно точно определить и понятие погрешности. Поэтому международные организации (*ISO*, *IEC*, *IMECO* и др.) выработали нормативные документы, в которых для оценки качества измерений применяют термин **неопределенность результата измерения**. Официально под неопределенностью результата измерения считают оценку, характеризующую диапазон значений, в котором находится истинное значение измеряемой величины. Основные положения о внедрении и использовании этого термина изложены в «Руководстве по применению неопределенности измерения» [11].

Существует несколько категорий неопределенности, отличающихся по содержанию и методу определения, однако все они являются мерой разброса возможных значений измеряемой величины вокруг полученного результата. Наиболее распространенной является **стандартная неопределенность** (обозначается $u(x)$). Это неопределенность результата, выраженная в форме стандартного отклонения. Может выражаться также в форме дисперсии $u^2(x)$ как квадрата стандартной неопределенности.

Стандартную неопределенность типа A находят путем статистической обработки серии результатов наблюдений:

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}, \quad (3.21)$$

где x_i — результат i -го наблюдения, \bar{x}_n — среднее значение результатов n наблюдений.

В случае измерения с помощью аналогового измерительного прибора основанием для определения **стандартной неопределенности типа B** является класс точности γ и так называемое нормирующее значение X_N . Для аналоговых (как и для цифровых) приборов оно чаще всего равно пределу измерения

X_k — конечному значению шкалы прибора: $X_N = X_k$. Принимая модель равномерной плотности распределения, стандартную неопределенность $u_B(x_n)$ показания $x = x_n$ аналогового прибора с пределом измерения X_k находят как:

$$u_B(x_n) = \frac{\gamma}{100\% \sqrt{3}} X_k. \quad (3.22)$$

Класс точности цифровых измерительных приборов нормируется обычно двухчленной формулой: c / d . В этом случае стандартная неопределенность показания цифрового прибора определяется как:

$$u_B(x_n) = \frac{d \cdot X_k + (c - d) \cdot x_n}{100\% \sqrt{3}}. \quad (3.23)$$

Для измерительных преобразователей, номинальный коэффициент преобразования которых не равен единице, погрешность может быть определена как по входу, так и по выходу.

Абсолютная погрешность измерительного преобразователя по входу — это разность между значением величины на входе преобразователя, определяемая (теоретически) по истинному значению величины на его входе с помощью градуировочной характеристики, и истинным значением величины на входе преобразователя. Практически вместо истинных значений величин принимают их действительные значения.

Абсолютная погрешность измерительного преобразователя по выходу определяется как разность между истинным (действительным) значением величины на выходе преобразователя, отображающей измеряемую величину, и значением величины на выходе, определяемым по истинному (действительному) значению величины на входе с помощью градуировочной характеристики [1, 6].

Поскольку возникновение погрешностей является следствием несовпадения действительной функции преобразования $F(x)$ и номинальной функции преобразования $F_{ном}(x)$ (рис. 3.2), то абсолютная погрешность по выходу может быть определена как [5]

$$\Delta y = y_\partial - y_{ном} = [k_\partial(x) - k_{ном}(x)] \cdot x_\partial, \quad (3.24)$$

где x_∂ — действительное значение величины, подаваемой по входу измерительного преобразователя; y_∂ — действительное значение выходной величины, измеренное на выходе преобразователя; $y_{ном}$ — значение выходной величины, определенное по номинальной функции преобразования $F_{ном}(x)$ для действительного значения входной величины x_∂ ; $k_\partial(x)$ и $k_{ном}(x)$ — действительный и номинальный коэффициенты преобразования.

Абсолютная погрешность по входу

$$\Delta x = x - x_\partial = \frac{y_\partial}{k_{ном,y}(x)} - x_\partial, \quad (3.25)$$

где x — значение входной величины, соответствующее значению выходной величины y_∂ и определяемое по номинальной функции преобразования; $k_{ном,y}(x)$ — номинальный коэффициент преобразования для значений y_∂ .

По степени неопределенности (или по характеру проявления) погрешности подразделяют на систематические и случайные.

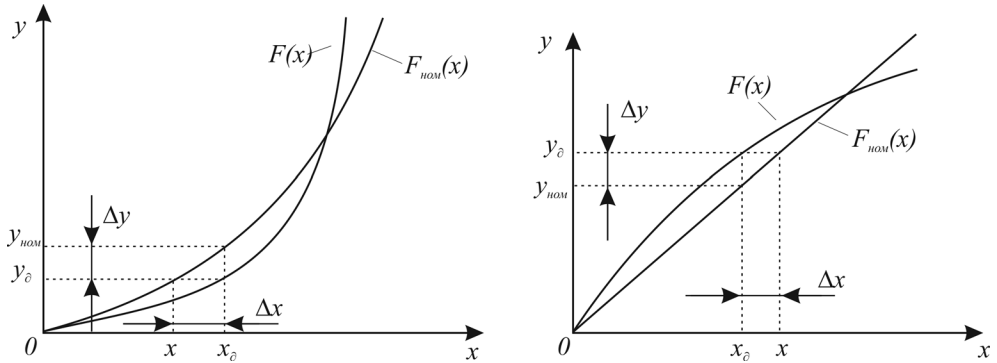


Рис. 3.2. К определению погрешностей измерительного преобразователя по входу и по выходу

Систематической погрешностью называют составляющую погрешности, значение которой при повторных измерениях остается постоянным. Систематической погрешностью является, например, погрешность, возникающая от нелинейности реальной градуировочной характеристики при аппроксимации ее линейной зависимостью.

Случайной погрешностью называют составляющую общей погрешности измерения (преобразования), значение которой при повторных преобразованиях величины с неизменным размером изменяется случайно.

Следовательно, в зависимости от степени неопределенности погрешность датчика (преобразователя), приведенная ко входу или выходу, может быть представлена как

$$\Delta_{вх} = \bar{\Delta}_{вх} + \dot{\Delta}_{вх}; \tag{3.26}$$

$$\Delta_{вых} = \bar{\Delta}_{вых} + \dot{\Delta}_{вых}, \tag{3.27}$$

где $\bar{\Delta}_{вх}$, $\bar{\Delta}_{вых}$ и $\dot{\Delta}_{вх}$, $\dot{\Delta}_{вых}$ — соответственно систематические и случайные погрешности.

Следует, однако, отметить, что вопрос о суммировании погрешностей значительно более сложный, чем это кажется на первый взгляд, и требует изучения в каждом случае [1, 5-7].

Случайные погрешности описываются методами математической статистики и теории вероятности [1, 6]. Для определения случайной погрешности необходимо провести для каждой (или выбранной) точки диапазона многократные измерения, далее по экспериментальным данным построить гистограмму распределения погрешностей.

Если распределение погрешностей отвечает нормальному закону, случайная погрешность оценивается по величине среднеквадратического отклонения δ

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \tag{3.28}$$

где n — число измерений; x_i — результат i -го измерения; \bar{x} — математическое ожидание (среднее значение) для n измерений.

Установлено, что при достаточно большом n случайная погрешность находится в интервале $\pm\delta$ с вероятностью 0,68; $\pm 2\delta$ — с вероятностью 0,95; наконец, $\pm 3\delta$ — с вероятностью 0,997 [1].

Погрешности в зависимости *от условий работы* преобразователя делятся на основные и дополнительные.

Основная погрешность — это погрешность, свойственная преобразователю при нормальных условиях его применения. Понятие «нормальные условия» оговариваются в стандартах и в технической документации на преобразователь. Например, нормальными могут быть следующие условия: температура окружающей среды 20 ± 5 °С; атмосферное давление 760 ± 20 мм рт. ст.; относительная влажность при температуре 20 ± 5 °С, равная 60^{+20}_{-15} %.

Дополнительные погрешности — это погрешности, возникающие при выходе значений влияющих факторов за оговоренные в технической документации пределы (например, для предыдущего случая выше — 25 °С).

Методические погрешности — погрешности, обусловленные методом измерения. Например, погрешность метода измерения артериального давления с помощью компрессионной манжеты (метод тонов Короткова) составляет ± 8 мм рт. ст., хотя погрешность измерения пневматического давления в манжете может составлять величину ± 1 мм рт. ст.

3.4. Динамические характеристики

Динамическими называют такие характеристики, которые проявляются лишь при работе преобразователя в динамическом режиме, т.е. когда преобразуемая величина является функцией времени (процессом).

Модель процесса, отображая зависимость от времени, характеризует динамику преобразования, его динамический режим, в котором преобразователь трактуется как динамическая система, а преобразование входного $X(t)$ сигнала в выходной сигнал $Y(t)$ записывается символично в виде [5]

$$Y(t) = AX(t), \quad (3.29)$$

где A — оператор динамической системы, понятие которого является обобщением понятия «коэффициент преобразования» и соответствующие математические и логические операции, необходимые для преобразования $X(t)$ в $Y(t)$.

Конкретный вид оператора определяется структурой и параметрами динамической системы. Если оператор удовлетворяет требованиям принципа суперпозиции, то он линейный и динамическая система также линейна, в противном случае — они нелинейны.

Система, параметры которой не зависят от времени, называется стационарной, а если зависят — нестационарной.

Теоретически все реальные динамические системы в большей или меньшей степени нелинейны и нестационарны, а их параметры — распределенные. Практически большинство из них номинально можно считать линейными стационарными динамическими системами с сосредоточенными параметрами, за исключением тех, у которых нелинейность положена в основу принципа действия [4, 6].

Линейная стационарная динамическая система с сосредоточенными параметрами описывается дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, \quad (3.30)$$

которое в операторной форме [2, 4] имеет вид

$$(a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0) y(t) = (b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0) x(t), \quad (3.31)$$

или короче

$$A_n(p) \cdot y(t) = B_m(p) \cdot x(t), \quad m \leq n, \quad (3.32)$$

откуда

$$y(t) = \frac{B_m(p)}{A_n(p)} x(t) = Lx(t), \quad (3.33)$$

где $p = d / dt$ — оператор дифференцирования; L — линейный оператор стационарной динамической системы.

Характеристика преобразования во временной области. Дифференциальное уравнение динамической системы является ее исчерпывающей характеристикой, но его коэффициенты с трудом поддаются экспериментальному определению. Поэтому в качестве характеристики преобразования во временной области используются импульсная (весовая) функция $q(t)$ и переходная функция $h(t)$ линейной динамической системы.

Импульсная функция $q(t) = L\delta(t)$ (рис. 3.3) является откликом (реакцией) динамической системы на входное возмущение в виде δ -функции, которая за определенением обладает свойствами

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \neq 0, \\ \infty, & \text{при } t = 0, \end{cases} \quad (3.34)$$

а

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1. \quad (3.35)$$

Выходной сигнал такой системы при произвольном ограниченном по значениям сигнале $x(t)$, который на довольно коротком промежутке удовлетворяет условию $x(t) = \text{const}$, выражается через $q(t)$ при помощи интегрального в виде

$$y(t) = \int_0^t q(t)x(t) dt. \quad (3.36)$$

Переходная функция (рис. 3.3)

$$h(t) = L1(t) = \int_0^t q(t) dt \quad (3.37)$$

является откликом линейной динамической системы на входное действие в виде единичной функции $1(t)$, производная от которой $\frac{d1(t)}{dt} = \delta(t)$.

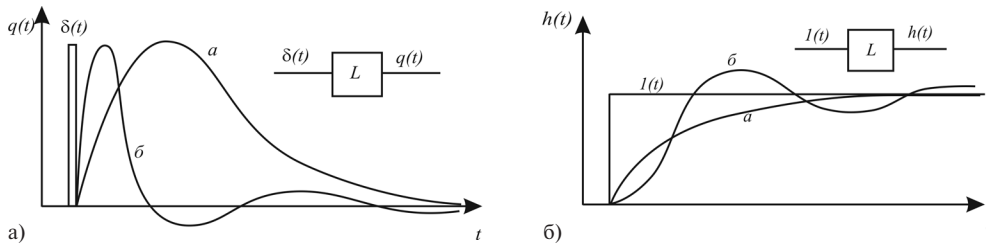


Рис. 3.3. Графики импульсной и переходной функций: а — аperiodической; б — колебательной

Поскольку $q(t) = \frac{dh(t)}{dt}$, то выходной сигнал

$$y(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t x(t)h(t)dt = \int_0^t x(t)dh(t). \quad (3.38)$$

Примером переходной характеристики $h(t)$ может быть отклонение движущейся части магнитоэлектрического гальванометра при его включении в цепь с напряжением.

Импульсная и переходная характеристики исчерпывающе описывают динамические свойства линейной динамической системы. Они сравнительно легко могут быть экспериментально определены. Используя информацию, которую они содержат, можно найти значения коэффициентов дифференциального уравнения, которые по-другому сложно идентифицировать.

Динамические свойства сложных средств измерительной техники (СИ) можно оценить по динамике измерительных преобразователей как составных элементов СИ. Кроме того, в большинстве случаев динамические свойства СИ определяются именно динамическими свойствами первичных измерительных преобразователей. Поэтому последующие выкладки относительно СИ будут сведены к динамике измерительных преобразователей.

В зависимости от порядка дифференциального уравнения, описывающего динамику измерительного преобразователя (порядка производной в уравнении), преобразователи делят на преобразователи первого, второго или высшего порядков. Сравнительные характеристики некоторых идеальных и реальных преобразователей первого порядка приведены в табл. 3.1.

Переходной процесс измерительных преобразователей первого порядка является аperiodическим, а в преобразователях второго порядка — колебательным (periodическим). Соответственно в динамической системе может происходить аperiodический, колебательный или другой сложный переходной процесс.

Аperiodический характер переходных процессов присущ тепловым и химическим преобразователям. Следует отметить, что в электрических, механических, акустических преобразователях наблюдается колебательный характер переходного процесса. Работа таких преобразователей описывается дифференциальными уравнениями второго порядка. В этом случае выходная величина, прежде чем принять установленное значение, несколько раз поочередно становится то выше, то ниже от него, то есть совершает колебания относительно этого уровня.

Таблица 3.1. Динамические характеристики преобразователей первого порядка

Вид преобразователя	Частотные характеристики	Временные характеристики
<p>Пропорциональный (безынерц.)</p> $a_0 Y(t) = b_0 X(t)$ $W(s) = k_0;$ $k_0 = b_0 / a_0$	<p>$k(\omega)$</p> <p>k_0</p> <p>0</p> <p>ω</p> <p>$k(\omega) = k_0$</p> <p>$\varphi(\omega)$</p> <p>0</p> <p>ω</p> <p>$\varphi(\omega) = 0$</p>	<p>$h(t)$</p> <p>k_0</p> <p>0</p> <p>t</p> <p>$h(t) = k_0 1(t)$</p> <p>$g(t)$</p> <p>0</p> <p>t</p> <p>$g(t) = k_0 \delta(t)$</p>
<p>Идеальный дифференцирующий</p> $a_0 Y(t) = b_1 \frac{dX(t)}{dt}$ $W(s) = Ts;$ $T = b_1 / a_0$	<p>$k(\omega)$</p> <p>0</p> <p>ω</p> <p>$k(\omega) = \omega T$</p> <p>$\varphi(\omega)$</p> <p>0</p> <p>ω</p> <p>$\varphi(\omega) = \pi/2$</p>	<p>$h(t)$</p> <p>0</p> <p>t</p> <p>$h(t) = T \delta(t)$</p> <p>$g(t)$</p> <p>0</p> <p>t</p> <p>$g(t) = T \delta(t)$</p>
<p>Идеальный интегрирующий</p> $a_1 \frac{dY(t)}{dt} = b_0 X(t)$ $W(s) = 1/Ts;$ $T = a_1 / b_0$	<p>$k(\omega)$</p> <p>0</p> <p>ω</p> <p>$k(\omega) = 1/\omega T$</p> <p>$\varphi(\omega)$</p> <p>0</p> <p>ω</p> <p>$\varphi(\omega) = -\pi/2$</p>	<p>$h(t)$</p> <p>0</p> <p>t</p> <p>$h(t) = t/T$</p> <p>$g(t)$</p> <p>$1/T$</p> <p>0</p> <p>t</p> <p>$g(t) = 1(t)/T$</p>
<p>Реальный дифференцирующий</p> $a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = b_1 \frac{dX(t)}{dt}$ $W(s) = k_1 \frac{dT_S}{T_S + 1};$ $k_1 = b_1 / a_1;$ $T = a_1 / a_0$	<p>$k(\omega)$</p> <p>k_1</p> <p>0</p> <p>$1/T$</p> <p>ω</p> <p>$k(\omega) = k_1 \omega T / (\omega^2 T^2 + 1)^{1/2}$</p> <p>$\varphi(\omega)$</p> <p>$0$</p> <p>$\omega$</p> <p>$\varphi(\omega) = \pi/2 - \arctg \omega T$</p>	<p>$h(t)$</p> <p>k_1</p> <p>0</p> <p>T</p> <p>t</p> <p>$h(t) = k_1 e^{-t/T}$</p> <p>$g(t)$</p> <p>0</p> <p>t</p> <p>$g(t) = -k_1 e^{-t/T}$</p>
<p>Реальный интегрирующий</p> $a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = b_0 X(t)$ $W(s) = k_0 \frac{1}{T_S + 1};$ $k_0 = b_0 / a_0; T = a_1 / a_0$	<p>$k(\omega)$</p> <p>k_0</p> <p>0</p> <p>$1/T$</p> <p>ω</p> <p>$k(\omega) = k_0 / (\omega T (\omega^2 T^2 + 1)^{1/2}$</p> <p>$\varphi(\omega)$</p> <p>$0$</p> <p>$\omega$</p> <p>$\varphi(\omega) = -\arctg \omega T$</p>	<p>$h(t)$</p> <p>k_0</p> <p>0</p> <p>T</p> <p>t</p> <p>$h(t) = k_0 (1 - e^{-t/T})$</p> <p>$g(t)$</p> <p>$0$</p> <p>$t$</p> <p>$g(t) = k_0 e^{-t/T}$</p>

Вследствие идентичности дифференциальных уравнений преобразователей с разной физической природой описание динамических свойств преобразователей второго порядка может быть осуществлено в обобщенных характеристиках, полученных решением уже известного дифференциального уравнения второго порядка с обобщенными параметрами, т.е. уравнения вида

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t), \quad (3.39)$$

где a_2 , a_1 , a_0 и b_0 — коэффициенты обобщенного преобразователя, значения которых определяются параметрами преобразователя.

Передаточная функция такого преобразователя будет выглядеть как:

$$W(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = k_0 \frac{1}{\frac{a_2}{a_0} s^2 + \frac{a_1}{a_0} s + 1}. \quad (3.40)$$

Обозначив степень успокоения преобразователя как $\beta = a_1 / 2\sqrt{a_0 a_2}$, а собственную частоту его колебаний через $\omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$, выражение для комплексного коэффициента преобразования будет иметь вид

$$K(j\omega) = k_0 \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j2\beta \frac{\omega}{\omega_0}}. \quad (3.41)$$

Если, кроме того, обозначить относительную частоту входного сигнала как $\eta = \omega / \omega_0$, то частотная характеристика примет вид

$$K(j\eta) = k_0 \frac{1}{1 - \eta^2 + j2\beta\eta} = k_0 \frac{1 - \eta^2 - j2\beta\eta}{(1 - \eta^2)^2 + 4\beta^2 \eta^2} = A(\eta)e^{j\varphi(\eta)}, \quad (3.42)$$

где $A(\eta) = k_0 \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4\beta^2 \eta^2}}$ — амплитудно-частотная характеристика;

$\varphi(\eta) = -\arctg \frac{2\beta\eta}{1 - \eta^2}$ фазочастотная характеристика преобразователя.

Для постоянного во времени входного сигнала, т.е. при $\omega = 0$, а следовательно, $\eta = 0$, получим $A(\eta)|_{\eta=0} = k_0$.

С учетом последнего выражения можно записать амплитудно-частотную характеристику колебательного преобразователя в относительных координатах по двум осям:

$$M(\eta) = \frac{A(\eta)}{k_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4\beta^2 \eta^2}}. \quad (3.43)$$

В это выражение, как и в выражение для фазочастотной характеристики, не входит ни одно абсолютное значение параметров преобразователя. Поэтому эти выражения можно использовать для описания работы преобразователя произвольной физической природы с произвольными значениями его параметров, если эти параметры представить в относительных единицах (рис. 3.4).

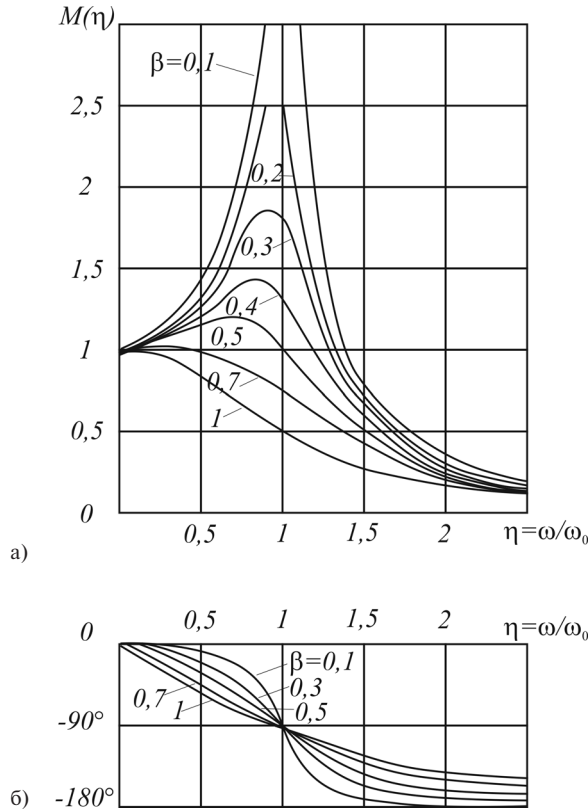


Рис. 3.4. Частотные характеристики преобразователя второго порядка

Таким образом, если преобразование измеряемых сигналов трактовать как процесс, тогда (в дополнение к статическому преобразованию или в противоположность статическому преобразованию) наилучшим способом их описания будут динамические параметры, являющиеся импульсными и переходными характеристиками как характеристики переходного процесса АЧХ и ФЧХ, т.е. характеристиками переменных во времени синусоидальных сигналов.

Для определения переходных характеристик преобразователя второго порядка его передаточная функция с учетом наведенных выше обозначений может быть записана в виде

$$W(s) = k_0 \frac{\omega_0^2}{(s + \beta\omega_0)^2 + \omega_0^2(1 - \beta^2)}. \quad (3.44)$$

Тогда, согласно теореме разложения, переходная функция будет иметь вид

$$h(t) = k_0 \left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \sin \left(\omega_0 t \sqrt{1 - \beta^2} + \arctg \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\beta} \right) \right], \quad (3.45)$$

а импульсная переходная функция

$$q(t) = k_0 \omega_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} e^{-\beta\omega_0 t} \sin \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2} t. \quad (3.46)$$

В зависимости от того, какое значение принимает β , возможны три случая:

1) $\beta < 1$ — переходной процесс будет колебательным с частотой свободных колебаний $\omega_B = \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ и амплитудой, которая затухает по экспоненте (рис. 3.5);

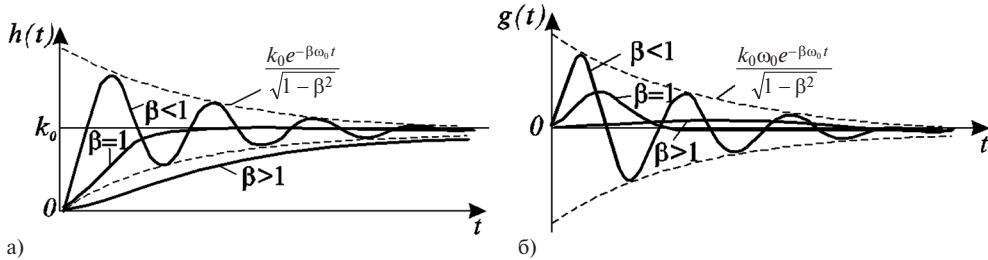


Рис. 3.5. Временные характеристики преобразователей второго порядка

2) $\beta > 1$ — характеризует аperiodически переходной процесс; переходная и импульсная переходная функции в этом случае с учетом того, что $\sin jx = jshx$, а $tgix = jthx$, будут иметь вид:

$$h(t) = k_0 \times \left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} sh \left(\omega_0 t \sqrt{\beta^2 - 1} + \operatorname{arcth} \frac{\sqrt{\beta^2 - 1}}{\beta} \right) \right], \quad (3.47)$$

$$g(t) = k_0 \omega_0 \frac{1}{\sqrt{\beta^2 - 1}} e^{-\beta\omega_0 t} sh [\omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1} t]; \quad (3.48)$$

3) $\beta = 1$ — характеризует критически режим, являющийся отдельным случаем аperiodического переходного процесса. При этом выражения для переходной и импульсной переходной функций имеют вид

$$h(t) = k_0 [1 - e^{-\omega_0 t} (1 + \omega_0 t)], \quad (3.49)$$

$$g(t) = k_0 \omega_0 t e^{-\omega_0 t}. \quad (3.50)$$

Следует отметить, что наибольшее практическое значение имеет случай, когда β чуть меньше единицы ($\beta \approx 0,8$), поскольку длительность переходного процесса в этом случае наименьшая.

3.5. Типовые динамические звенья

Элементы, различные по физической природе, конструкции, мощности и другим характеристикам, но описываемые линейными дифференциальными уравнениями одного и того же вида (имеющие одинаковые передаточные функции), являются одинаковыми **динамическими звеньями** [2, 4].

Во многих случаях [4] удобно представлять датчики в виде одного или нескольких типовых звеньев с известной передаточной характеристикой, АЧХ, ФЧХ, импульсной и переходной характеристикой. Такое предположение обычно легко проверить экспериментально.

Большинство преобразователей описываются типовыми динамическими звеньями, передаточные функции которых имеют в числителе и знаменателе полиномы от s не выше второго порядка [2].

Передаточную функцию динамического звена в общем случае можно представить как произведение сомножителей вида:

$$\left. \begin{aligned} &K; S^{\nu}; \frac{1}{T_s + 1}; \frac{1}{T^2 S^2 + 2\xi T_s + 1}; \\ &\tau s + 1; \tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1 \end{aligned} \right\}, \quad (3.51)$$

где K , ν , T , ξ , $\tau\xi$ — постоянные, причем $K > 0$, ν — может быть положительным и отрицательным целым числом, $T > 0$, $0 < \xi < 1$, $\tau > 0$, $0 < \xi < 1$.

Описание динамических характеристик колебательных, дифференцирующих и интегрирующих звеньев можно найти в [2, 4].

Литература

1. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. — М.: Изд. стандартов, 1985. — 256 с.
2. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). — М.: Машиностроение, 1977. — 464 с.
3. Новый словарь иностранных слов. — Минск: Современный литератор, 2005. — 1088 с.
4. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. — Л.: Энергия, 1971. — 544 с.
5. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. — Киев: Вища школа, 1981. — 296 с.
6. Полищук Е.С. и др. Средства и методы измерений неэлектрической величины: Учебник/Под ред. проф. Е.С. Полищука. — «Бескид-Бт», 2008. — 618 с. (На укр. яз.).
7. Рудзит Я.А., Плуталов В.М. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении. — М.: Машиностроение, 1991. — 304 с.
8. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. — 592 с.
9. ГОСТ 8.009-89. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
10. ГОСТ 27.002-89. Надежность. Термины и определения.
11. Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO 1993. 1995.