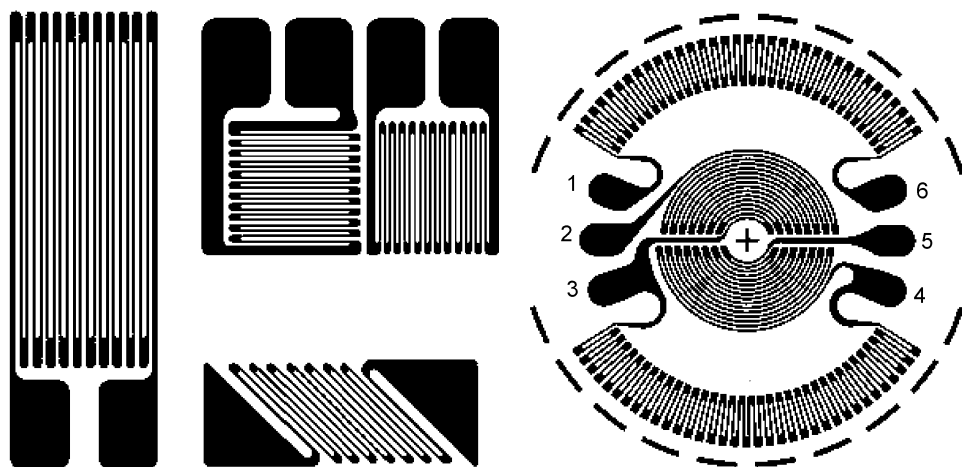


POMIARY

Czujniki i metody pomiarowe
wybranych wielkości fizycznych
i składu chemicznego



POMIARY

Autorzy

Dr inż. Dariusz Buchczik – rozdz. 6, 7

Dr inż. Witold Ilewicz – rozdz. 9

Prof. dr hab. inż. Janusz Piotrowski – rozdz. 5, 8

Dr hab. inż. Stanisław Waluś – rozdz. 4

Dr inż. Roman Wyżgolik – rozdz. 1, 2

Dr inż. Janusz Żelezik – rozdz. 3

POMIARY

Czujniki i metody pomiarowe
wybranych wielkości fizycznych
i składu chemicznego

pod redakcją

Prof. dr. hab. inż. Janusza Piotrowskiego

Opiniodawcy
prof. dr hab. inż. Marian Milek
prof. dr hab. inż. Jerzy Stańda

Do wydania II przygotowała *Maria Kasperska*
Redaktor *mgr inż. Małgorzata Wiśniewska*

Projekt okładki i stron tytułowych *Grafos*
Redaktor techniczny *Ewa Kosińska*
Korekta *Zespół*
Skład i łamanie *ANGO*

Wydawca *Adam Filutowski*

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo WNT
Warszawa 2009, 2012
Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2017

ISBN 978-83-01-19288-4

Wydanie II zmienione – 1 dodruk (PWN)
Warszawa 2017

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl
www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

Spis treści

Wstęp	13
1. Wprowadzenie	15
1.1. Definicja pomiaru i terminów z nim związanych	15
1.2. Podstawowe pojęcia	19
1.2.1. Aparatura pomiarowa	19
1.2.2. Przyrząd pomiarowy	19
1.2.3. Systemy pomiarowe	22
1.2.4. Definicje błędów	23
1.3. Przetwarzanie wielkości	28
1.3.1. Czujniki i przetworniki analogowe	28
1.3.2. Próbkowanie wielkości	29
1.3.3. Kwantowanie wielkości	31
1.3.4. Stopień zliczania, przetwornik A/C do pomiaru czasu lub częstotliwości	33
1.3.5. Przetworniki C/A napięcia	36
1.3.6. Przetworniki A/C kompensacyjne	38
1.3.7. Przetworniki A/C całkujące	41
1.3.8. Przetworniki A/C z pojedynczym całkowaniem	42
1.3.9. Przetworniki A/C z podwójnym całkowaniem	44
1.4. Modulacja i przesył sygnałów	46
1.4.1. Sygnał	46
1.4.2. Modulacja szerokości impulsów	48
1.4.3. Sieć pomiarowa	52
1.4.4. Pętla prądowa	54
1.4.5. Protokół HART	55
1.4.6. Inne magistrale obiektowe	57
1.4.7. Standard IEEE 1451	58

- 1.4.8. Interfejs IEC-625 61
- 1.4.9. Bezprzewodowa transmisja sygnałów pomiarowych 63
- 1.5. Właściwości metrologiczne aparatury pomiarowej 63
- 1.6. Czynności metrologiczne 69
- Literatura 73

2. Pomiary temperatury

75

- 2.1. Skale temperatury 75
 - 2.1.1. Wprowadzenie 75
 - 2.1.2. Termodynamiczna skala temperatury 75
 - 2.1.3. Międzynarodowa Skala Temperatury MST-90 78
- 2.2. Termometry nieelektryczne 81
 - 2.2.1. Wprowadzenie 81
 - 2.2.2. Termometry szklane 81
 - 2.2.3. Termometry dylatacyjne i bimetalowe 85
 - 2.2.4. Termometry ciśnieniowe 86
- 2.3. Termometry rezystancyjne 87
 - 2.3.1. Ogólna charakterystyka 87
 - 2.3.2. Czujniki rezystancyjne metalowe 88
 - 2.3.3. Układy pomiarowe czujników rezystancyjnych metalowych 91
 - 2.3.4. Termistory 97
 - 2.3.5. Rezystancyjne czujniki krzemowe 100
- 2.4. Termometry termoelektryczne 102
 - 2.4.1. Budowa termometru termoelektrycznego 102
 - 2.4.2. Zasada działania termoelementów 102
 - 2.4.3. Budowa termoelementów 104
 - 2.4.4. Rodzaje termoelementów i ich właściwości 106
 - 2.4.5. Termoelementy nieznormalizowane 108
 - 2.4.6. Korekcja błędów od temperatury zimnych końców 109
 - 2.4.7. Automatyczna korekcja błędu temperaturowego 111
- 2.5. Półprzewodnikowe czujniki temperatury 113
 - 2.5.1. Czujniki diodowe 113
 - 2.5.2. Czujniki scalone 114
- 2.6. Pirometry 115
 - 2.6.1. Zasada działania pirometru 115
 - 2.6.2. Obiekt pomiaru 117
 - 2.6.3. Detektory promieniowania 120
 - 2.6.4. Budowa pirometrów 122
 - 2.6.5. Eliminacja błędu metody pirometrów 124
 - 2.6.6. Termografia 129
- 2.7. Inne rodzaje termometrów 130
 - 2.7.1. Termometry szumowe 130
 - 2.7.2. Termometry luminescencyjne 131
 - 2.7.3. Termometr światłowodowy typu „ciało czarne” 132
 - 2.7.4. Termometry ultradźwiękowe 133
- 2.8. Technika pomiarów temperatury i źródła błędów 134
 - 2.8.1. Ogólna charakterystyka technik 134

2.8.2.	Odprowadzanie ciepła przez czujnik pomiarowy	134
2.8.3.	Wpływ promieniowania na temperaturę czujnika	136
2.8.4.	Pomiar temperatury ciał w ruchu	137
2.9.	Błędy dynamiczne	138
2.9.1.	Model matematyczny czujnika temperatury	138
2.9.2.	Wyznaczanie właściwości dynamicznych termometrów	141
2.10.	Wzorcowanie termometrów	144
2.10.1.	Zasady wzorcowania termometrów	144
2.10.2.	Podstawowe wyposażenie laboratorium wzorcowania termometrów	145
2.10.3.	Układy pomiarowe stanowisk wzorcowania	149
2.10.4.	Wzorcowanie pirometrów	151
2.10.5.	Ocena niedokładności wzorcowania	151
	Literatura	160

3. Pomiary ciśnienia

162

3.1.	Zagadnienia ogólne	162
3.1.1.	Wstęp	162
3.1.2.	Definicje	163
3.1.3.	Jednostki ciśnienia	164
3.1.4.	Rodzaje mierzonego ciśnienia	165
3.1.5.	Zakresy mierzonych ciśnień	167
3.1.6.	Różne metody pomiaru ciśnienia – podział ciśnieniomierzy	168
3.2.	Czujniki sprężyste	171
3.2.1.	Elementy sprężyste ciśnieniomierzy	171
3.2.2.	Czujniki piezorezystancyjne	174
3.2.3.	Korekcja błędów piezorezystancyjnych czujników ciśnienia	181
3.2.4.	Czujniki pojemnościowe	192
3.2.5.	Czujniki indukcyjnościowe	194
3.3.	Czujniki z przetwarzaniem ciśnienia na siłę	196
3.3.1.	Czujniki piezoelektryczne	196
3.3.2.	Czujniki rezonansowe	199
3.4.	Czujniki optyczne	206
3.5.	Procesowe przetworniki ciśnienia i instalacje pomiarowe	209
3.5.1.	Funkcje i właściwości przetworników klasycznych i inteligentnych	209
3.5.2.	Charakterystyki metrologiczne	214
3.5.3.	Charakterystyki funkcjonalne i użytkowe ważne przy doborze przetworników	217
3.5.4.	Przetworniki wieloparametrowe	221
3.6.	Kalibratory ciśnienia i kalibracja	223
3.6.1.	Wprowadzenie	223
3.6.2.	Manometry hydrostatyczne	224
3.6.3.	Manometry obciążnikowo-tłokowe	227
	Literatura	235

4. Pomiary poziomu 237

- 4.1. Wprowadzenie 237
- 4.2. Podział metod pomiaru poziomu 237
- 4.3. Ręczne pomiary poziomu 238
 - 4.3.1. Poziomomierz wziernikowy 238
 - 4.3.2. Poziomomierz prętowy 239
 - 4.3.3. Poziomomierz sondujący 240
- 4.4. Pomiary ciągłe poziomu 240
 - 4.4.1. Poziomomierz pływakowy 240
 - 4.4.2. Poziomomierz waporowy 242
 - 4.4.3. Poziomomierz hydrostatyczny 243
 - 4.4.4. Poziomomierz piezometryczny 245
 - 4.4.5. Poziomomierz wagowy 246
 - 4.4.6. Poziomomierz oporowy 246
 - 4.4.7. Poziomomierz pojemnościowy 247
 - 4.4.8. Poziomomierz z tłumieniem promieniowania 249
 - 4.4.9. Poziomomierze akustyczne i ultradźwiękowe 251
 - 4.4.10. Poziomomierze radarowe 253
- 4.5. Sygnalizatory poziomu 254
 - 4.5.1. Wprowadzenie 254
 - 4.5.2. Sygnalizator wibracyjny 255
 - 4.5.3. Sygnalizator z ruchomym elementem 255
 - 4.5.4. Sygnalizator izotopowy 255
- 4.6. Dobór i eksploatacja poziomomierzy 256
- Literatura 257

5. Pomiary prędkości i przepływu płynów 258

- 5.1. Wprowadzenie 258
- 5.2. Pomiary prędkości płynów 263
 - 5.2.1. Rurki spiętrzające 263
 - 5.2.2. Anemometry elektryczne 268
 - 5.2.3. Prędkościomierze turbinowe 273
 - 5.2.4. Pomiary prędkości na zasadzie Dopplera 274
- 5.3. Przepływomierze 279
 - 5.3.1. Wprowadzenie 279
 - 5.3.2. Przepływomierze zwężkowe 281
 - 5.3.3. Rotametry 296
 - 5.3.4. Przepływomierze turbinowe 298
 - 5.3.5. Przepływomierze wirowe 303
 - 5.3.6. Przepływomierze na zasadzie zjawiska Coriolisa 305
 - 5.3.7. Przepływomierze elektromagnetyczne 308
 - 5.3.8. Przepływomierze ultradźwiękowe 312
 - 5.3.9. Inne przepływomierze 319
- 5.4. Liczniki objętości płynów 322
 - 5.4.1. Licznik a przepływomierz 322
 - 5.4.2. Liczniki gazów 322
 - 5.4.3. Liczniki cieczy 324

5.5.	Pomiary przepływu w kanałach otwartych	327
5.5.1.	Rodzaje kanałów otwartych	327
5.5.2.	Przelewy	328
5.5.3.	Koryta pomiarowe	331
5.5.4.	Inne metody	333
5.6.	Wzorcowanie przepływomierzy	337
5.6.1.	Wprowadzenie	337
5.6.2.	Stanowiska wzorcownicze	338
5.6.3.	Legalizacja przepływomierzy	342
	Literatura	342

6. Pomiary drgań i wstrząsów 345

6.1.	Wprowadzenie	345
6.2.	Model dynamiczny akcelometru	346
6.3.	Akcelerometry z kompensacją siły	349
6.4.	Czułość poprzeczna	351
6.5.	Akcelerometry piezoelektryczne	352
6.5.1.	Zjawisko piezoelektryczne	352
6.5.2.	Model elektryczny czujnika piezoelektrycznego	354
6.5.3.	Czujniki z wyjściem ładunkowym o dużej impedancji wyjściowej	355
6.5.4.	Czujniki z wyjściem napięciowym o małej impedancji wyjściowej	357
6.5.5.	Konstrukcja mechaniczna akcelometrów piezoelektrycznych	358
6.6.	Akcelerometry pojemnościowe	361
6.7.	Akcelerometry piezorezystancyjne	363
6.8.	Akcelerometry termiczne	364
6.9.	Akcelerometry dwu- i trzyosiowe	366
6.10.	Montaż akcelometrów	366
6.11.	Wzorcowanie czujników przyspieszenia	368
6.12.	Sejsmometry	370
6.13.	Wybrane dziedziny zastosowań czujników drgań	374
6.13.1.	Diagnostyka wibroakustyczna maszyn	374
6.13.2.	Analiza modalna konstrukcji	379
6.13.3.	Motoryzacja	382
6.13.4.	Sejsmologia górnicza	384
	Literatura	386

7. Pomiary hałasu 387

7.1.	Wprowadzenie	387
7.2.	Drgania akustyczne i dźwięk	387
7.3.	Równanie falowe	388
7.4.	Pole akustyczne	389

7.4.1.	Charakterystyka ogólna	389
7.4.2.	Płaskie fale akustyczne	390
7.4.3.	Kuliste fale akustyczne	391
7.5.	Wielkości akustyczne	392
7.5.1.	Natężenie dźwięku	392
7.5.2.	Moc akustyczna	393
7.5.3.	Poziom wielkości akustycznych	394
7.5.4.	Głośność dźwięku	394
7.6.	Mikrofony	395
7.6.1.	Klasyfikacja	395
7.6.2.	Mikrofony ciśnieniowe	396
7.6.3.	Mikrofony gradientowe	397
7.6.4.	Mikrofony ciśnieniowo-gradientowe	397
7.6.5.	Charakterystyki mikrofonów	398
7.6.6.	Membrany mikrofonów	399
7.6.7.	Mikrofony stykowe	400
7.6.8.	Mikrofony magnetoelektryczne	401
7.6.9.	Mikrofony elektromagnetyczne	402
7.6.10.	Mikrofony elektrostatyczne	402
7.6.11.	Mikrofony elektretowe	404
7.6.12.	Mikrofony piezoelektryczne	405
7.6.13.	Mikrofony krzemowe	406
7.7.	Kalibracja mikrofonów	407
7.7.1.	Wprowadzenie	407
7.7.2.	Kalibracja z wykorzystaniem pobudników tłokowych	408
7.7.3.	Kalibracja metodą porównawczą	408
7.8.	Pomiary wielkości akustycznych	409
7.8.1.	Mikrofony pomiarowe	409
7.8.2.	Pomiary poziomu ciśnienia akustycznego	410
7.8.3.	Pomiary poziomu natężenia dźwięku	413
7.9.	Wybrane dziedziny pomiarów hałasu	414
7.9.1.	Wprowadzenie	414
7.9.2.	Pomiary hałasu w środowisku	415
7.9.3.	Pomiary hałasu w pomieszczeniach	416
7.9.4.	Pomiary hałasu maszyn i urządzeń	417
Literatura		420

8. Pomiary składu chemicznego

422

8.1.	Wprowadzenie	422
8.2.	Pomiary składu chemicznego na podstawie przemiany materii	427
8.2.1.	Chemiczne przemiany materii	427
8.2.2.	Elektrochemiczne przemiany materii	437
8.3.	Pomiary składu z zastosowaniem promieniowania	467
8.3.1.	Wprowadzenie	467
8.3.2.	Spektrometria atomowa: emisyjna i absorpcyjna	468
8.3.3.	Spektrometria rentgenowska	489
8.3.4.	Spektrometria molekularna (cząsteczkowa)	495

8.3.5.	Spektrometria rezonansu paramagnetycznego EPR	506
8.3.6.	Spektrometria rezonansu magnetycznego NMR	509
8.4.	Chromatografia	515
8.4.1.	Wprowadzenie	515
8.4.2.	Chromatografia gazowa	515
8.4.3.	Chromatografia cieczowa	528
8.5.	Zagadnienia wybrane	531
8.5.1.	Pobieranie próbek do analizatorów o działaniu dyskretnym	531
8.5.2.	Analizatory wstrzykowe	536
8.5.3.	Pobieranie próbek do analizatorów o działaniu ciągłym	537
8.5.4.	Analizatory termokonduktometryczne	540
8.5.5.	Przemysłowe analizatory tlenu w gazach	545
8.5.6.	Analizatory gazu na zasadzie absorpcji w podczerwieni	548
8.5.7.	Wzorcowanie analizatorów	551
	Literatura	556

9.	Pomiary wilgotności	558
-----------	----------------------------	------------

9.1.	Pomiary wilgotności powietrza	558
9.1.1.	Podstawowe definicje i wzory	558
9.1.2.	Higrometr włosowy	562
9.1.3.	Psychrometr Assmana	563
9.1.4.	Higrometr punktu rosy (z chłodzonym lustrem)	564
9.1.5.	Higrometry elektrolityczne z chlorku litu	566
9.1.6.	Impedancyjne czujniki (sensory) higrometryczne	568
9.1.7.	Higrometry spektrometryczne	569
9.1.8.	Higrometry kulometryczne	570
9.1.9.	Wzorcowanie higrometrów i wzorce wilgotności	570
9.2.	Pomiary wilgotności ciał stałych	576
9.2.1.	Podstawowe definicje, pojęcia i wzory	576
9.2.2.	Metoda grawimetryczna	579
9.2.3.	Metoda oparta na zmianie pojemności cieplnej materiału	583
9.2.4.	Metoda oparta na zmianie rezystancji materiału	584
9.2.5.	Pomiar na podstawie właściwości dielektrycznych	586
9.2.6.	Techniki oparte na zastosowaniu promieniowania podczerwonego	591
9.2.7.	Mikrofalowy pomiar zawartości wilgoci	593
9.2.8.	Rozpraszanie jądrowe	595
9.2.9.	Podsumowanie	596
	Literatura	598

Wstęp

Pomiary są obszerną dziedziną wiedzy, gdyż występują w codziennej pracy niemal w każdym zawodzie inżynierskim. Inżynier powinien znać wielkości fizyczne i cechy obiektów, z jakimi styka się w swojej pracy, współczesną aparaturę pomiarową, niedokładność wyników pomiarów i sposób jej oceniania, a także warunki i zasady eksploatacji aparatury.

Aparatura pomiarowa jest ciągle doskonałona; jedne przyrządy przestają być używane, a w ich miejsce powstają nowe – zminiaturyzowane, skomputeryzowane, budowane z lepszych materiałów i trwalsze w użyciu. Automatyzacji podlegają czynności obsługi aparatury i procedury przetwarzania wyników. Równocześnie coraz więcej informacji katalogowych aparatury dotyczy głównie wyglądu, spełnianych funkcji i możliwości oprogramowania przyrządów skomputeryzowanych. Coraz powszechniej używana nazwa „czujniki inteligentne” wiąże się z przedstawianiem czujnika w postaci „czarnej skrzynki”. Aby dokonać doboru czujników do konkretnych zastosowań, należy znać zasady ich działania, właściwości i sposoby specyfikacji parametrów.

Jednym z celów napisania niniejszej książki było dostarczenie Czytelnikowi aktualnej wiedzy dotyczącej pomiarów. Autorzy prezentują w niej pomiary stosowane w dziedzinach, z którymi zetknęli się w swoich pracach dla przemysłu, w pracy naukowej oraz dydaktycznej. Z tego względu książka obejmuje pomiary m.in. następujących parametrów: temperatury, ciśnienia i poziomu przepływu, drgań, wstrząsów i hałasu, składu chemicznego i wilgotności, a więc dotyczy podobnego zakresu, jak znana książka E. Romera „Miernictwo przemysłowe” (wydanie III poprawione i uzupełnione, 1978 r.). W pomiarach składu chemicznego próbuje się połączyć pomiary instrumentalne z analizą chemiczną, choć udziału chemika w tych czynnościach nikt nie zastąpi. „Wprowadzenie” do

książki zawiera przegląd metod przetwarzania sygnałów, informacje o systemach pomiarowych oraz informacje o obowiązujących przepisach prawnych.

Książka może być przydatna dla pracowników ośrodków rozwojowo-badawczych oraz laboratoriów, jako pomoc w przygotowaniu i realizacji prac badawczych. Autorzy prezentują aparaturę stosowaną w energetyce, przemyśle chemicznym, hutnictwie, gospodarce komunalnej, ochronie środowiska, przemyśle spożywczym i in., i adresują książkę także do specjalistów w tych dziedzinach.

Książka może również służyć jako podręcznik akademicki na kierunkach, które kształcą projektantów, producentów, serwistanów i użytkowników aparatury pomiarowej, a więc na automatyce, elektronice, elektrotechnice, mechanice i fizyce. Polecana jest także dyplomantom i słuchaczom studiów doktoranckich na wyżej wymienionych kierunkach.

1. Wprowadzenie

1.1. Definicja pomiaru i terminów z nim związanych

Pomiarem nazywamy czynności, po których wykonaniu możemy stwierdzić, że w chwili pomiaru dokonanego w określonych warunkach, przy zastosowaniu określonych środków, mierzona wielkość x miała następującą wartość

$$a \leq x \leq b \quad (1.1)$$

Stwierdzenie, że wielkość x jest nie mniejsza niż a i równocześnie nie większa niż b nazywamy **wynikiem pomiaru**. Wyniku nie doprowadzamy do matematycznej równości $a = b$, gdyż zmniejszanie różnicy

$$b - a = 2\varepsilon \quad (1.2)$$

jest niemożliwe lub niecelowe. Symbol ε ($\varepsilon > 0$) oznacza liczbę, która charakteryzuje **niedokładność pomiaru**.

PRZYKŁAD 1.1.

Człowiek jest zdolny rozróżnić nieuzbrojonym okiem dwa punkty odległe co najmniej o 0,05 mm. Lupa zwiększa zdolność rozróżnienia punktów kilkakrotnie, mikroskop kilkasetkrotnie, a mikroskop elektronowy około milionkrotnie. Niemniej próg czułości istnieje nadal i ma skończoną wartość. Ograniczeniem może być koszt narzędzi pomiarowych.

W praktyce wartość 2ε może się okazać nieskończenie mała, wskutek czego wynik pomiaru $a \leq x \leq b$ będzie bliski równości $a = b$.

Pomiary wykonuje się po to, aby poznać stan jakiegoś obiektu. **Obiektem** jest właściwość ciała fizycznego, przedmiotu, stan środowiska, poziom energetyczny zjawiska, skład chemiczny ciała i inne właściwości, dla których istnieje jeden fizyczny wzorec, definiujący te właściwości i określający tzw. stan odniesienia. Oznacza to, że wynik pomiaru jest wyrażany zawsze w odniesieniu do wzorca. Wzorec ma przypisaną miarę, która definiuje jednostkę miary danej wielkości fizycznej, a wynik pomiaru jest liczbą rzeczywistą, określającą stan wielkości wyrażony w odpowiednich jednostkach miary.

PRZYKŁAD 1.2.

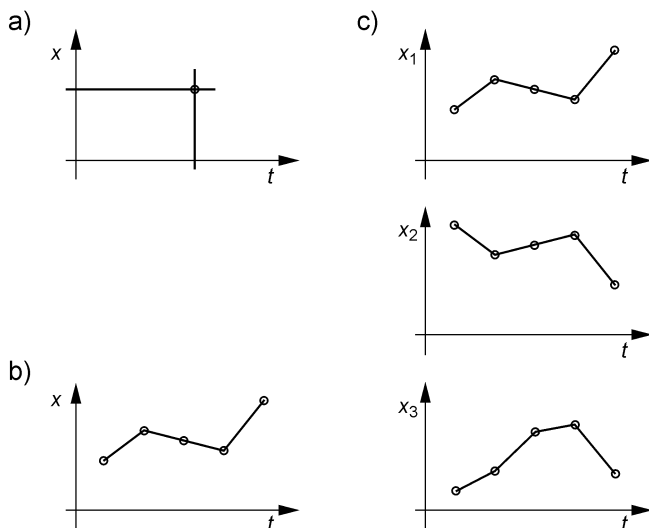
Wzorcem jednostki temperatury jest punkt potrójny wody: stan równowagi trzech faz: wody, pary wodnej i lodu. Stanowi temu przypisano wartość temperatury wynoszącą 273,16 kelwina. Jednostka miary temperatury – 1 kelwin (K) – stanowi $1/273,16$ część temperatury punktu potrójnego wody.

Wszystkie wielkości fizyczne podzielono na dwie grupy: podstawowe i pochodne. Podstawowych wielkości fizycznych jest siedem. Odróżniają się największą dokładnością odtwarzania. Pozostałe wielkości fizyczne, zwane wielkościami pochodnymi, zdefiniowano na podstawie znanych praw fizyki i jednostek miary wielkości podstawowych. Utworzone jednostki miary tworzą układ jednostek SI przyjęty przez Generalną Konferencję Miar.

Wyniki pomiarów wyraża się liczbami rzeczywistymi z odpowiednią jednostką miary. Przyporządkowanie liczb stanom obiektu pomiaru nazywa się skalą pomiarową. Przyjętą powszechnie skalę nazywa się skalą metryczną lub ilorazową. Elementy wyrażone w skali metrycznej można porównywać i orzekać, czy są równe, większe, czy mniejsze. Wymienione relacje można badać na wartościach wielkości, różnicach i ilorazach wartości. Wymagań skali metrycznej nie spełniają: skala temperatury Celsjusza i skala czasu kalendarzowego. Pełniejsze informacje o skalach i wzorcach Czytelnik znajdzie w [5], [6], [7].

Obiekty pomiaru są bardziej złożone. Obiekt może się charakteryzować niezmiennym stanem, co wyraża się jedną wartością – liczbą rzeczywistą. Jest to tzw. wartość chwilowa wielkości. Informacja, że jedna wartość jest wystarczającą charakterystyką obiektu pomiaru musi pochodzić z innego źródła i nie jest wynikiem tego pomiaru. Wynik pomiaru wartości chwilowej można przedstawić na rysunku jako punkt na osi liczbowej. Na podstawie rysunku 1.1a nie można określić, jaki był stan wielkości przed pomiarem i jaki będzie po pomiarze.

Obiektem pomiaru może być ciąg stanów nazywany **przebiegiem czasowym**; jest on opisywany jako funkcja zmiennej t , mianowicie $x(t)$. Zmienną t



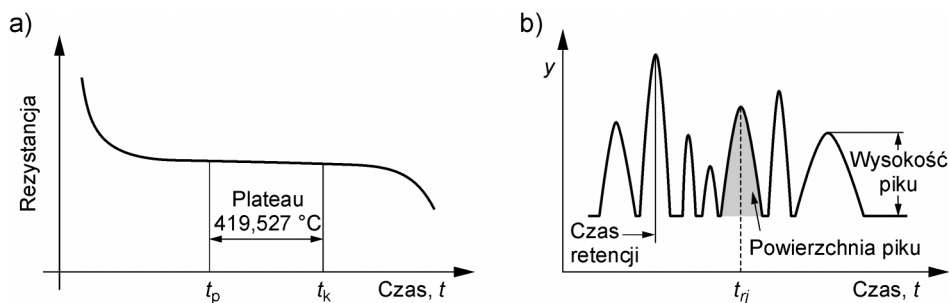
Rysunek 1.1. Przykładowe wyniki pomiarów: a) wartości chwilowej, b) przebiegu czasowego, c) jednoczesnego pomiaru trzech wielkości

najczęściej jest czas, numer, ale może być też droga, długość fali lub inna wielkość fizyczna. Przebieg czasowy można przedstawiać dla zmiennej t ciągłej lub dyskretnej, co przedstawiono na rys. 1.1b. Od osoby wykonującej pomiar zależy, jaki charakter: ciągły czy dyskretny, ma zmienna t . W ten sposób poznajemy „zachowanie się” obiektu w czasie lub względem innej wielkości, którą należy mierzyć równocześnie.

Obiektem pomiaru może być wartość średnia kilku wartości chwilowych, średnia po czasie, drodze, objętości itp. Wartość średnią można wyznaczać z wartości punktowych lub mierzyć jako właściwość charakterystyczną (charakterystykę) obiektu za pomocą przyrządu do pomiaru wartości średniej. Podobne obiekty pomiaru to: wartość skuteczna, rozkład harmoniczny, gęstość widmowa mocy, rozkład prawdopodobieństwa i inne.

Obiekt pomiaru może być wielowymiarowy. Oznacza to, że interesuje nas jednoczesne poznanie stanów kilku właściwości obiektu – ich wartości chwilowych albo przebiegów czasowych. Pokazano to na rys. 1.1c.

Obiekt pomiaru może być złożony. Tak nazwiemy obiekt, którego stan wyznaczamy na podstawie charakterystycznego przebiegu jednej lub kilku wielkości. Przykładem niech będzie przebieg czasowy temperatury kąpiel metalu w tyglu, pokazany na rys. 1.2a, a obserwowany za pomocą rezystancyjnego, platynowego czujnika temperatury. Początkowo metal w tyglu jest w stanie roztopionym i stygnie. Po czasie t_p zaczyna krzepnąć, co jest rozpoznawane po charakterystycznym płaskim przebiegu krzywej zwanym *plateau*. Po czasie t_k metal przechodzi w stan stały i temperatura się zmniejsza. Miarą temperatury krzepnięcia jest poziom sygnału *plateau*.



Rysunek 1.2. Charakterystyczne obrazy zjawisk fizycznych, z których wyznacza się parametr będący wynikiem pomiaru: a) krzywa krzepnięcia niklu, b) chromatogram

Innym przykładem jest sygnał spektrometryczny lub chromatograficzny pokazany na rys. 1.2b, składający się z szeregu pików. Miara stężenia j -tego składnika badanej substancji jest powierzchnia pików pod krzywą (zakreskowana na rysunku) odniesiona do powierzchni wszystkich pików; rodzaj składnika określa wartość odciętej t_{rj} maksimum pików. Wynik pomiarów ze spektrogramu wyznacza się według złożonych algorytmów, szczególnie gdy piki zachodzą na siebie.

Złożoność obiektu z zakresu składu chemicznego określa się nazwami: analiza elementarna i analiza specjacyjna. Przykładem niech będzie stężenie chloru w wodzie pitnej. Wyróżnia się chlor użyteczny wolny w postaci: kwasu chlorowego(I) (podchlorowego) HClO , anionu kwasu chlorowego(I) ClO^- , chloru molekularnego Cl_2 i chlor użyteczny związany: chloramina i inne związki, jak np. NH_2Cl , NHCl_2 . Wyznaczanie stężenia Cl oznacza analizę elementarną. Specjacja to wyznaczanie stężenia chloru występującego we wszystkich wymienionych postaciach, gdyż każda z nich ma inne znaczenie w procesie dezynfekcji i nadaje inne właściwości wodzie pitnej.

Pomiar jest działaniem celowym, tzn. przed wykonaniem pomiaru trzeba dobrze znać cel pomiaru. Cel określa charakterystyka i definicja obiektu badań, warunki występowania badanego zjawiska, czas trwania zjawiska, inne specyficzne ograniczenia i – najważniejsze – wymagana niedokładność pomiaru oznaczona jako ε we wzorze (1.2). Charakterystyka obiektu została już omówiona wcześniej, a definicję obiektu pomiaru objaśnimy na podstawie prostego przykładu.

PRZYKŁAD 1.3.

Obiektem pomiaru niech będzie średnica kulki metalowej, którą można zdefiniować jako:

- wartość średnia wyników pomiarów średnicy w kilku kierunkach,
- wymiar oczka w sicie, przez które kulka przelatuje, ale nie przelatuje przez sito o nieco większych oczkach,

- wartość średnicy obliczona na podstawie pomiaru objętości kulki (zmierzonej na przykład piknometrem) przy założeniu, że kulka jest okrągła, co nie wyczerpuje wszystkich możliwych definicji.

Czasami definicję obiektu pomiaru nazywa się mezurandem, co jest nową nazwą zaczerpniętą z języka angielskiego.

Niedokładność pomiaru (inną nazwą używaną zamiennie jest niepewność, choć zdaniem autora oznacza coś innego), zgodnie z równaniami (1.1) i (1.2), określa niejednoznaczność wyniku pomiaru. Cel pomiaru będzie osiągnięty tylko wówczas, gdy niedokładność nie przekroczy wartości wymaganej. Ocena niedokładności wyniku powinna być dokonana przed wykonaniem pomiaru, wielowariantowo, gdyż pozwoli to wybrać racjonalne procedury pomiaru na podstawie szacowanych kosztów pomiaru.

1.2. Podstawowe pojęcia

1.2.1. Aparatura pomiarowa

Aparatura pomiarowa to środki techniczne służące do wykonywania pomiarów. Są to: wzorce jednostek miary, przyrządy pomiarowe i przybory pomiarowe. Przybory to urządzenia ułatwiające wykonywanie pomiarów, np. termostaty, zasilacze o stabilizowanym napięciu, urządzenia do poziomowania itd. Wzorec jednostki miary danej wielkości fizycznej jest to ciało fizyczne, służące do odtwarzania jednostki miary z określoną niedokładnością. Wzorce w zasadzie nie służą do wykonywania pomiarów, gdyż samym wzorcem nie można nic zmierzyć. Wzorce mogą być częścią przyrządu w niektórych metodach pomiarowych. Przyrządy pomiarowe są to środki techniczne przeznaczone do bezpośredniego lub pośredniego wykonywania pomiarów. Istnieje duża różnorodność przyrządów i stosowane są różne nazwy określające ich rodzaj.

1.2.2. Przyrząd pomiarowy

Przyrząd pomiarowy jest urządzeniem zintegrowanym (zwartym), do którego doprowadza się wielkość mierzoną x i z pola odczytowego można odczytać surowy wynik pomiaru x^* , wyrażony w jednostkach miary wielkości mierzonej. Pole odczytowe może być analogowe, jako oś liczbowa wielkości mierzonej, lub cyfrowe, z odczytem wartości liczbowej wyniku. Przyrządem pomiarowym jest na przykład termometr szklany, przymiar wstęgowy, woltomierz, ciśnieniomierz,