

SPIS TREŚCI

1.	Pojęcia podstawowe	13
1.1.	Obiekt fizyczny, wielkość fizyczna (mierzalna)	13
1.2.	Proces pomiarowy	14
1.3.	Jednostka miary, układy wielkości i układy jednostek miar	15
1.4.	Urządzenia pomiarowe	18
1.4.1.	Wprowadzenie	18
1.4.2.	Wzorce	19
1.4.3.	Przyrządy pomiarowe	20
1.4.4.	Przetworniki pomiarowe	21
1.4.5.	Układy pomiarowe	21
1.4.6.	Systemy pomiarowe	21
1.5.	Metody pomiarowe	21
1.5.1.	Pojęcie metody pomiarowej i klasyfikacja metod	21
1.5.2.	Metody analogowe i cyfrowe	22
1.5.3.	Metody bezpośrednie, pośrednie i złożone	22
1.5.4.	Metoda podstawowa	23
1.5.5.	Metody porównawcze	23
1.6.	Metody przetwarzania	25
1.6.1.	Metoda przekształcenia	25
1.6.2.	Metoda bezpośredniego porównania	25
2.	Określanie dokładności pomiarów	26
2.1.	Błąd i niepewność pomiaru	26
2.2.	Klasyfikacja błędów pomiarów	28
2.3.	Błędy systematyczne	29
2.4.	Błędy przypadkowe	30
2.4.1.	Błędy przypadkowe jako zmienna losowa i parametry jej rozkładu	30
2.4.2.	Rozkłady prawdopodobieństwa zmiennej losowej	33
2.5.	Obliczanie błędów granicznych przy pomiarach bezpośrednich i pośrednich —	41
2.6.	Niepewność jako miara dokładności pomiarów	45
2.6.1.	Typy niepewności pomiarów	45
2.6.2.	Obliczanie niepewności standardowych i rozszerzonych przy pomiarach bezpośrednich i pośrednich	46
3.	Elementy techniki eksperymentu	53
3.1.	Wprowadzenie	53
3.2.	Modele badanego obiektu	53

SPIS TREŚCI

3.3.	Planowanie eksperymentu	55
3.4.	Dobór urządzeń pomiarowych w procesie pomiarowym	58
3.5.	Zasady przeprowadzania pomiarów bezpośrednich i pośrednich	59
3.6.	Opracowanie wyników pomiarów	59
3.7.	Wyznaczanie charakterystyk na podstawie wyników pomiarów	62
4.	Ogólne wiadomości o urządzeniach pomiarowych	67
4.1.	Zasady podziału, schematy funkcjonalne i strukturalne urządzeń pomiarowych	67
4.2.	Podział przyrządów i przetworników pomiarowych według spełnianych funkcji	68
4.3.	Podział przyrządów i przetworników pomiarowych ze względu na charakter wyjściowej informacji pomiarowej	69
4.4.	Struktury przyrządów i przetworników pomiarowych	71
4.5.	Właściwości statyczne przyrządów i przetworników pomiarowych	72
4.5.1.	Charakterystyki i parametry opisujące właściwości statyczne analogowych przyrządów i przetworników pomiarowych	72
4.5.2.	Parametry statyczne cyfrowych przyrządów pomiarowych i przetworników analogowo-cyfrowych	77
4.6.	Właściwości dynamiczne przyrządów i przetworników pomiarowych	80
4.6.1.	Charakterystyki i parametry opisujące właściwości dynamiczne analogowych przyrządów i przetworników pomiarowych	80
4.6.2.	Parametry dynamiczne cyfrowych przyrządów pomiarowych i przetworników analogowo-cyfrowych	89
5.	Wzorce jednostek elektrycznych i źródła sygnałów wzorcowych	92
5.1.	Hierarchia wzorców	92
5.2.	Wzorcowe źródła prądu stałego	93
5.2.1.	Waga prądowa	93
5.2.2.	Kalibratory prądu	94
5.3.	Źródła wzorcowych napięć stałych	95
5.3.1.	Ogniwa Westona	95
5.3.2.	Źródła oparte na zjawisku Josephsona	97
5.3.3.	Źródła z diodami Zenera	98
5.3.4.	Kalibratory napięcia	101
5.4.	Wzorce rezystancji	102
5.4.1.	Wzorzec kwantowy	102
5.4.2.	Rezystory wzorcowe	102
5.4.3.	Rezystory dekadowe	105
5.5.	Wzorce pojemności	106
5.6.	Wzorce indukcyjności	110
5.6.1.	Wzorce indukcyjności własnej	110
5.6.2.	Wzorce indukcyjności wzajemnej	111
5.7.	Źródła częstotliwości wzorcowych	112
5.7.1.	Podział wzorców	112
5.7.2.	Wzorzec częstotliwości cezowy — atomowy zegar cezowy	112
5.7.3.	Wzorzec częstotliwości wodorowy — maser wodorowy	115
5.7.4.	Wzorzec częstotliwości rubidowy	116

SPIS TREŚCI

5.7.5.	Generatory pomiarowe	H6
5.7.5.1.	Podział i wymagania	116
5.7.5.2.	Generatory małej częstotliwości	118
5.7.5.3.	Generatory wielkiej częstotliwości	120
5.7.5.4.	Syntezy częstotliwości	121
5.7.5.5.	Generatory cyfrowe	123
6.	Przetworniki pomiarowe wielkości elektrycznych.	127
6.1.	Wprowadzenie	127
6.2.	Przetworniki elektromechaniczne	128
6.2.1.	Wprowadzenie	128
6.2.2.	Przetworniki magnetoelektryczne	128
6.2.3.	Przetworniki elektromagnetyczne	131
6.2.4.	Przetworniki elektrodynamiczne i ferrodynamiczne	132
6.2.5.	Przetworniki elektrostatyczne	134
6.2.6.	Przetworniki indukcyjne	136
6.3.	Przetworniki sygnałów elektrycznych	140
6.3.1.	Wprowadzenie	140
6.3.2.	Boczniki	140
6.3.3.	Rezystory dodatkowe (posobniki)	142
6.3.4.	Dzielniki napięć	143
6.3.4.1.	Wprowadzenie	143
6.3.4.2.	Dzielniki rezystancyjne	143
6.3.4.3.	Dzielniki pojemnościowe	144
6.3.4.4.	Dzielniki indukcyjnościowe	145
6.3.5.	Tłumiki	146
6.3.6.	Przekładniki prądu przemiennego	148
6.3.6.1.	Wprowadzenie	148
6.3.6.2.	Przekładniki prądowe	149
6.3.6.3.	Przekładniki napięciowe	156
6.3.7.	Przekładniki prądu stałego	166
6.3.8.	Wzmacniacze pomiarowe	167
6.3.8.1.	Ogólne właściwości wzmacniaczy pomiarowych	167
6.3.8.2.	Rola ujemnego sprzężenia zwrotnego we wzmacniaczu pomiarowym	168
6.3.8.3.	Wzmacniacze pomiarowe prądu przemiennego	171
6.3.8.4.	Wzmacniacze pomiarowe prądu stałego	173
6.3.8.5.	Wzmacniacze izolujące	176
6.3.8.6.	Przetworniki I/U i U/I	176
6.3.8.7.	Przetworniki standaryzujące i pętla prądowa	178
6.3.8.8.	Przetworniki całkujące i różniczkujące	178
6.3.8.9.	Przetworniki Q/U	180
6.3.9.	Przetworniki prostownikowe	182
6.3.9.1.	Wiadomości wstępne	182
6.3.9.2.	Prostowniki wartości średniej	183
6.3.9.3.	Fazoczułe prostowniki wartości średniej	185
6.3.9.4.	Prostowniki wartości skutecznej	188
6.3.9.5.	Prostowniki wartości szczytowej	188
6.3.10.	Analogowe przetworniki mnożące	192
6.3.11.	Przetworniki prawdziwej wartości skutecznej (TRMS)	197
6.3.12.	Przetworniki próbkująco-pamiętające	199
6.3.13.	Przetworniki cyfrowo-cyfrowe (C/C)	200

SPIS TREŚCI

6.3.13.1.	Wprowadzenie	200
6.3.13.2.	Bramki logiczne i przerzutniki bistabilne	203
6.3.13.3.	Zegar taktujący	208
6.3.13.4.	Rejestry	208
6.3.13.5.	Liczniki	210
6.3.13.6.	Systemy mikroprocesorowe	214
6.3.14.	Przetworniki cyfrowo-analogowe (C/A)	218
6.3.14.1.	Wprowadzenie	218
6.3.14.2.	Struktury i właściwości przetworników C/A	219
6.3.15.	Przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C)	224
6.3.15.1.	Wprowadzenie	224
6.3.15.2.	Bloki pomocnicze przetworników analogowo-cyfrowych	233
6.3.15.3.	Przetworniki A/C bezpośrednie	235
6.3.15.4.	Przetworniki A/C pośrednie	240
6.3.16.	Przetworniki mocy	252
6.3.16.1.	Wprowadzenie	252
6.3.16.2.	Przetworniki mocy z układami mnożącymi analogowymi	253
6.3.16.3.	Przetworniki mocy z układami mnożącymi cyfrowymi	258
6.3.17.	Przetworniki wielkości magnetycznych	259
6.3.17.1.	Wprowadzenie	259
6.3.17.2.	Przetworniki magnetoindukcyjne	260
6.3.17.3.	Przetworniki transduktorowe	262
6.3.17.4.	Przetworniki hallotronowe	263
6.3.17.5.	Przetworniki gaussotronowe	266
6.3.17.6.	Układ przetwarzający natężenie pola magnetycznego metodą rezonansu magnetycznego	266
6.3.17.7.	Przetworniki SQUID	268

7. Wybrane czujniki i przetworniki wielkości nieelektrycznych 270

7.1.	Wprowadzenie	270
7.2.	Klasyfikacja przetworników pomiarowych wielkości nieelektrycznych	270
7.3.	Podstawowe właściwości inteligentnych przetworników pomiarowych	272
7.4.	Przetworniki mechatroniczne	274
7.4.1.	Wprowadzenie	274
7.4.2.	Przetworniki potencjometryczne	276
7.4.3.	Tensometry metalowe	277
7.4.4.	Piezorezystory	280
7.4.5.	Przetworniki tensometryczne sił, momentów, ciśnienia i parametrów ruchu	282
7.4.6.	Przetworniki pojemnościowe	295
7.4.7.	Przetworniki piezoelektryczne	300
7.4.7.1.	Wprowadzenie	300
7.4.7.2.	Przetworniki piezoelektryczne ceramiczne	301
7.4.7.3.	Przetworniki piezoelektryczne foliowe	308
7.5.	Przetworniki termoelektryczne	309
7.5.1.	Wprowadzenie	309
7.5.2.	Przetworniki termoelektryczne stykowe	310
7.5.2.1.	Wprowadzenie	310
7.5.2.2.	Termorezystory	310

SPIS TREŚCI

7.5.2.3.	Termoogniwa	316
7.5.2.4.	Właściwości dynamiczne przetworników termoelektrycznych	319
7.5.3.	Pirometry i kamery termowizyjne	321
7.5.3.1.	Wprowadzenie	321
7.5.3.2.	Pirometry	324
7.5.3.3.	Kamery termowizyjne	327
7.6.	Przetworniki optoelektroniczne	337
7.6.1.	Wprowadzenie	337
7.6.2.	Fotosensory	338
7.6.2.1.	Wprowadzenie	338
7.6.2.2.	Fotorezystory	338
7.6.2.3.	Fotodiody i fotoogniwa	339
7.6.2.4.	Fototranzystory	342
7.6.2.5.	Fotosensory zintegrowane	344
7.6.2.6.	Właściwości dynamiczne fotosensorów	345
7.6.3.	Przetworniki światłowodowe	346
7.6.4.	Wybrane laserowe urządzenia pomiarowe	349
7.6.4.1.	Wprowadzenie do techniki laserowej	349
7.6.4.2.	Dalmierze laserowe	353
7.6.4.3.	Lidary	355
7.7.	Przetworniki chemoelektryczne	358
7.7.1.	Wprowadzenie	358
7.7.2.	Przetworniki konduktometryczne	359
7.7.3.	Elektrody stężeniowe	364
8.	Mierniki	375
8.1.	Wprowadzenie	375
8.2.	Bloki pomocnicze mierników	376
8.2.1.	Wprowadzenie	376
8.2.2.	Urządzenia odczytowe mierników analogowych	376
8.2.3.	Komutatory elektroniczne	377
8.2.4.	Dekodery i wskaźniki cyfrowe w mierniku cyfrowym	378
8.2.5.	Oznaczenia i symbole na miernikach	381
8.3.	Woltomierze	382
8.3.1.	Wprowadzenie	382
8.3.2.	Woltomierze napięć stałych	383
8.3.2.1.	Wprowadzenie	383
8.3.2.2.	Woltomierze analogowe napięć stałych	383
8.3.2.3.	Woltomierze cyfrowe napięć stałych	386
8.3.3.	Woltomierze napięć zmiennych	391
8.3.3.1.	Wprowadzenie	391
8.3.3.2.	Woltomierze analogowe napięć zmiennych	391
8.3.3.3.	Woltomierze cyfrowe napięć zmiennych	396
8.3.4.	Mikroprocesorowe woltomierze cyfrowe	397
8.4.	Amperomierze	398
8.4.1.	Wprowadzenie	398
8.4.2.	Amperomierze prądu stałego	398
8.4.3.	Amperomierze prądu zmiennego	402
8.5.	Mierniki rezystancji, pojemności i indukcyjności	404
8.5.1.	Wprowadzenie	404
8.5.2.	Omomierz z przetwarzaniem rezystancji na napięcie	404

SPIS TREŚCI

8.5.3.	Mierniki cyfrowe z przetwarzaniem rezystancji, pojemności i indukcyjności na przedział czasu	405
8.6.	Mierniki mocy	406
8.7.	Częstościomierze i czasomierze cyfrowe	408
8.7.1.	Częstościomierz	408
8.7.2.	Czasomierz	412
8.7.3.	Mikroprocesorowe częstościomierze-czasomierze	413
8.8.	Fazomierze cyfrowe	416
8.9.	Multimetry	420
8.9.1.	Wprowadzenie	420
8.9.2.	Multimetry analogowe	420
8.9.3.	Multimetry cyfrowe	421
9.	Liczniki energii elektrycznej	423
9.1.	Wprowadzenie	423
9.2.	Liczniki energii elektrycznej prądu przemiennego	423
9.2.1.	Wprowadzenie	423
9.2.2.	Elektromechaniczne liczniki energii elektrycznej prądu przemiennego	424
9.2.2.1.	Wprowadzenie	424
9.2.2.2.	Liczniki indukcyjne jednofazowe	425
9.2.2.3.	Liczniki indukcyjne trójfazowe i specjalne	425
9.2.3.	Elektroniczne liczniki energii elektrycznej prądu przemiennego	429
9.2.4.	Wymagania stawiane licznikom energii elektrycznej prądu przemiennego	433
9.3.	Liczniki prądu stałego	434
9.3.1.	Liczniki energii elektrycznej prądu stałego	434
9.3.2.	Liczniki magnetoelektryczne ładunku elektrycznego (liczniki amperogodzin) —	434
9.3.3.	Liczniki elektrochemiczne ładunku elektrycznego	435
9.3.4.	Liczniki elektroniczne ładunku elektrycznego	435
10.	Przyrządy do rejestracji, obrazowania i analizy sygnałów. . . .	437
10.1.	Wprowadzenie	437
10.2.	Rejestratory	437
10.3.	Oscyloskopy	439
10.3.1.	Wprowadzenie	439
10.3.2.	Oscyloskopy analogowe	439
10.3.2.1.	Zasada działania oscyloskopu analogowego	439
10.3.2.2.	Rodzaje i parametry lamp oscyloskopowych	441
10.3.2.3.	Rodzaje rozciągów i układów podstawy czasu	443
10.3.2.4.	Układy wejściowe i wzmacniacze w kanałach oscyloskopu	450
10.3.2.5.	Kalibratory napięcia i czasu	452
10.3.2.6.	Oscyloskopy wielokanałowe	452
10.3.3.	Oscyloskopy cyfrowe	454
10.3.3.1.	Wprowadzenie	454
10.3.3.2.	Próbkowanie i akwizycja oraz technika odtwarzania przebiegu sygnałów w oscyloskopie cyfrowym	455
10.3.3.3.	Wyzwalanie rozciągu liniowego w oscyloskopie cyfrowym	457
10.3.3.4.	Wierność odtwarzania przebiegów sygnałów w oscyloskopie cyfrowym	458
10.3.3.5.	Rodzaje pracy oscyloskopu cyfrowego	459
10.4.	Przyrządy do analizy sygnałów	460
10.4.1.	Wprowadzenie	460

SPIS TREŚCI

10.4.2.	Mierniki zniekształceń nieliniowych	467
10.4.3.	Analogowe analizatory widma	468
10.4.4.	Cyfrowe analizatory widma	470
10.4.4.1.	Struktura i zasada działania analizatora — algorytm szybkiej transformaty Fouriera	470
10.4.4.2.	Zniekształcenia widma i rola okien czasowych	473
11.	Wybrane układy pomiarowe	477
11.1.	Wprowadzenie	477
11.2.	Kompensatory	477
11.2.1.	Kompensatory napięć i prądów stałych	477
11.2.2.	Kompensatory napięć przemiennych	482
11.3.	Mostki pomiarowe	482
11.3.1.	Wprowadzenie	482
11.3.2.	Mostki prądu stałego	483
11.3.2.1.	Mostki prądu stałego zrównoważone	483
11.3.2.2.	Mostki prądu stałego niezrównoważone	491
11.3.3.	Mostki prądu przemiennego	493
11.3.3.1.	Wiadomości wstępne	493
11.3.3.2.	Mostki czteroramienne	495
11.3.3.3.	Mostki transformatorowe	501
11.3.3.4.	Automatyczne mostki cyfrowe RLC	504
12.	Systemy pomiarowe	507
12.1.	Wprowadzenie	507
12.2.	Systemy z kartami pomiarowymi	508
12.3.	Systemy magistralowo-interfejsowe	511
12.3.1.	Wprowadzenie	511
12.3.2.	Systemy z magistralą GPIB (IEC-625)	511
12.3.3.	Systemy modułowe VXI	512
12.3.4.	Interfejsy szeregowo	514
12.3.5.	Systemy przemysłowe	515
12.3.6.	Systemy z przetwornikami inteligentnymi	515
12.3.7.	Wirtualne przyrządy pomiarowe	515
12.3.8.	Magistrale komputerowe w systemach pomiarowych	516
12.3.9.	Interfejsy bezprzewodowe	516
12.4.	Oprogramowanie systemów pomiarowych	521
12.5.	Zasady kompletacji systemu pomiarowego	527
13.	Pomiary wielkości elektrycznych	528
13.1.	Wprowadzenie	528
13.2.	Pomiary napięcia i prądu	528
13.3.	Pomiary RLC	533
13.3.1.	Pomiary rezystancji	533
13.3.2.	Pomiary indukcyjności, pojemności i rezystancji strat	529
13.4.	Pomiary częstotliwości	544
13.5.	Pomiary mocy czynnej	546
13.6.	Pomiary mocy biernej	551
13.7.	Pomiary przesunięcia fazowego	553

SPIS TREŚCI

14.	Pomiary wielkości magnetycznych	557
14.1.	Pomiary pola magnetycznego	557
14.1.1.	Wiadomości wstępne	557
14.1.2.	Pomiary strumienia i indukcji magnetycznej z wykorzystaniem przetwornika magnetoindukcyjnego	558
14.1.3.	Pomiary indukcji za pomocą hallotronu	559
14.2.	Pomiary właściwości materiałów magnetycznych	560
14.2.1.	Wiadomości wstępne	560
14.2.2.	Wyznaczanie krzywej magnesowania	563
14.2.3.	Wyznaczanie krzywej magnesowania metodą różnicową	566
14.2.4.	Pomiary dynamicznej charakterystyki magnesowania i stratności magnetycznej	568
15.	Pomiary wielkości nieelektrycznych	574
15.1.	Wprowadzenie	574
15.2.	Pomiary wymiarów geometrycznych	575
15.3.	Pomiary sił i momentów	575
15.4.	Pomiary ciśnienia	577
15.5.	Pomiary parametrów ruchu	579
15.6.	Pomiary temperatury	586
15.7.	Pomiary stężenia roztworów	589
15.8.	Zdalne monitorowanie zanieczyszczeń atmosfery	593
15.8.1.	Wprowadzenie	593
15.8.2.	Techniki zdalnego monitoringu atmosfery	593
16.	Krajowa służba miar	598
16.1.	Zadania podstawowe	598
16.2.	Organizacja	599
16.3.	Normy	600
	Tablice rozkładu normalnego	602
	Tablica rozkładu Studenta	604
	Tablica rozkładu χ^2	605
	Bibliografia	606
	Skorowidz	611