

Spis treści

1	Wprowadzenie	13
1.1.	Przetwornik – czujnik – sensor	13
1.2.	Przemiany energetyczne w czujniku	14
1.3.	Klasyfikacja czujników	17
1.4.	Właściwości statyczne przetworników	19
1.5.	Technologia wytwarzania czujników	21
1.6.	Czujniki inteligentne	22
2	Wielkości uogólnione	27
2.1.	Uogólnione siły i uogólnione prędkości	27
2.2.	Uogólniona impedancja	29
2.3.	Analityczny opis przetwarzania energetycznego	31
2.4.	Przykład uogólnionej analizy przetwornika	32
3	Właściwości dynamiczne przetworników	38
3.1.	Stan dynamiczny przetwornika pomiarowego	38
3.2.	Sygnały wzorcowe – testowe	38
3.3.	Charakterystyki dynamiczne	40
3.3.1.	Charakterystyki operatorowe przetworników	40
3.3.2.	Charakterystyki czasowe przetworników	41
3.3.3.	Charakterystyki częstotliwościowe przetworników	42
3.4.	Przetworniki bezinercyjne – zerowego rzędu	43
3.5.	Przetworniki inercyjne pierwszego rzędu	44
3.6.	Przetworniki inercyjne drugiego rzędu	46
3.7.	Sygnał błędu dynamicznego	51
4	Pomiary wielkości opisujących ruch	53
4.1.	Wielkości opisujące ruch i metody ich pomiaru	53
4.2.	Czujniki przemieszczeń liniowych ze zmianą parametrów obwodów elektrycznych	56
4.2.1.	Czujniki rezystancyjne	56
4.2.2.	Czujniki pojemnościowe	57
4.2.3.	Czujniki indukcyjnościowe	65
4.2.4.	Czujniki zbliżeniowe	74
4.3.	Pomiary przemieszczeń liniowych za pomocą ultradźwięków	80
4.3.1.	Ultradźwięki	80

4.3.2.	Rozchodzenie się fali ultradźwiękowej w ośrodku ciągłym	82
4.3.3.	Impedancja akustyczna	85
4.3.4.	Tłumienie fal ultradźwiękowych	88
4.3.5.	Odbicie i przenikanie fali ultradźwiękowej na granicy dwóch ośrodków	89
4.3.6.	Przetworniki ultradźwiękowe	91
4.3.7.	Konstrukcja przetworników ultradźwiękowych	106
4.3.8.	Zastosowanie przetworników ultradźwiękowych do pomiaru przemieszczeń liniowych	112
4.4.	Zastosowanie czujników optoelektronicznych w pomiarach przemieszczeń liniowych	118
4.4.1.	Charakterystyka czujników optoelektronicznych . . .	118
4.4.2.	Źródła promieniowania świetlnego w czujnikach optoelektronicznych	120
4.4.3.	Detektory optyczne w czujnikach optoelektronicznych	123
4.4.4.	Światłowodowy	128
4.4.5.	Pomiar przemieszczeń czujnikami optoelektronicznymi z torami optycznymi otwartymi	133
4.4.6.	Pomiar przemieszczeń czujnikami optoelektronicznymi z torami optycznymi zamkniętymi	138
4.5.	Pomiary przyspieszeń liniowych	141
4.5.1.	Analiza układu z masą inercyjną	141
4.5.2.	Piezoelektryczne czujniki przyspieszenia	145
4.5.3.	Czujniki przyspieszenia pojemnościowe	147
4.5.4.	Czujniki przyspieszenia piezorezystancyjne	153
4.5.5.	Czujniki przyspieszenia światłowodowe	154
4.5.6.	Czujniki przyspieszenia hallotronowe	156
4.6.	Pomiary prędkości liniowej	158
4.7.	Pomiary przemieszczeń i prędkości kątowych	162
4.7.1.	Pomiary przemieszczeń kątowych	162
4.7.2.	Czujniki prędkości kątowej	165

5	Pomiary poziomu	172
5.1.	Podział metod pomiaru poziomu	172
5.2.	Czujniki pływakowe	174
5.3.	Czujnik hydrostatyczny	177
5.4.	Czujnik optoelektroniczny	179
5.5.	Przetworniki ultradźwiękowe do pomiaru poziomu	180
5.6.	Pomiary poziomu metodą pojemnościową	184

5.7.	Przetworniki mikrofalowe do pomiaru poziomu	186
5.8.	Izotopowy miernik poziomu	190
5.8.1.	Wielkości opisujące promieniowanie jonizujące . . .	190
5.8.2.	Źródła promieniowania	191
5.8.3.	Detektory promieniowania jonizującego	192
5.9.	Izotopowe mierniki poziomu	196
6	Pomiary siły i masy	201
6.1.	Metody pomiaru siły i masy oraz ich miary	201
6.2.	Tensometryczne czujniki siły	203
6.2.1.	Efekt tensometryczny w przewodnikach	203
6.2.2.	Efekt tensometryczny w półprzewodnikach – piezorezystowność	206
6.2.3.	Konstrukcja tensometrów	210
6.2.4.	Układy pomiarowe z tensometrycznymi czujnikami siły	213
6.2.5.	Zasilanie mostków tensometrycznych	216
6.2.6.	Właściwości dynamiczne tensometrycznych czujników siły	219
6.2.7.	Wagi tensometryczne	220
6.3.	Magnetyczne czujniki siły	222
6.3.1.	Wpływ naprężenia na właściwości magnetyczne . . .	222
6.3.2.	Przykłady konstrukcji magnetosprężystych czujników siły	225
6.4.	Czujniki piezoelektryczne siły	228
6.5.	Czujniki światłowodowe masy i siły	229
6.6.	Izotopowe mierniki masy	231
7	Pomiar momentu obrotowego	234
7.1.	Moment obrotowy	234
7.2.	Tensometryczny pomiar momentu obrotowego	236
7.3.	Optoelektroniczna metoda pomiaru momentu obrotowego	239
8	Pomiary ciśnienia	242
8.1.	Definicje miar i jednostki ciśnienia	242
8.2.	Przegląd metod i przyrządów do pomiaru ciśnienia	244
8.3.	Ciśnieniomierze aneroidalne	246
8.4.	Rozkład wydłużeń i naprężeń w membranie kołowej	248
8.5.	Czujniki ciśnienia tensometryczne z metalową membraną płaską	251
8.6.	Czujniki ciśnienia krzemowe - piezorezystancyjne	253

8.7.	Czujniki ciśnienia z membraną ceramiczną	256
8.8.	Czujniki ciśnienia membranowe pojemnościowe	257
8.9.	Czujniki ciśnienia światłowodowe z membraną płaską . . .	261

9 Pomiary temperatury 264

9.1.	Skale temperatury	264
9.2.	Podział metod pomiaru temperatury	267
9.3.	Termometry rezystancyjne metalowe	270
9.3.1.	Zależność rezystancji od temperatury	270
9.3.2.	Układy pomiaru rezystancji rezystorów termometrycznych	273
9.3.3.	Konstrukcja i technologia rezystorów termometrycznych	276
9.3.4.	Właściwości metrologiczne rezystancyjnych czujników temperatury	277
9.4.	Termometry rezystancyjne – półprzewodnikowe	280
9.4.1.	Termistory	280
9.4.2.	Silistory	282
9.5.	Czujniki temperatury półprzewodnikowe – złączone	283
9.6.	Czujniki termoelektryczne	289
9.6.1.	Zjawiska związane z generacją sił termoelektrycznych	289
9.6.2.	Termoelementy	297
9.7.	Termometry szumowe	302
9.7.1.	Szumy termiczne	302
9.7.2.	Układy termometrów szumowych	305
9.8.	Termometr szumowy – termoelement	306
9.9.	Termometry kwarcowe	308
9.9.1.	Cięcia kryształu SiO ₂	308
9.9.2.	Piezorezonansowe czujniki temperatury	312
9.10.	Światłowodowe czujniki temperatury	316
9.11.	Bezstykowy pomiar temperatury – pirometria	320
9.11.1.	Promieniowanie temperaturowe	320
9.11.2.	Uwarunkowania pomiaru temperatury za pomocą pirometrów	325
9.12.	Właściwości toru optycznego	328
9.13.	Detektory pirometrów	330

10 Pomiary natężenia przepływu płynów 334

10.1.	Wielkości charakteryzujące przepływ płynów	334
10.2.	Podział przepływomierzy	338

10.3.	Przepływomierz zwężkowy	340
10.4.	Przepływomierz pływakowy – rotametr	342
10.5.	Przepływomierz z rurką spiętrzającą	344
10.6.	Przepływomierz turbinowy	347
10.7.	Przepływomierz elektromagnetyczny	347
10.8.	Przepływomierz ultradźwiękowy	355
10.9.	Przepływomierz termooanemometryczny	360
10.10.	Przepływomierz kalorymetryczny	364
10.11.	Przepływomierze Coriolisa	367
10.12.	Przepływomierze wirowe	370
10.13.	Przepływomierz korelacyjny	374

11 Pomiary wilgotności 382

11.1.	Definicje i jednostki miar wilgotności	382
11.2.	Metody pomiaru wilgotności	384
11.3.	Pomiary wilgotności powietrza	387
11.3.1.	Higrometry włosowe	387
11.3.2.	Higrometr absorpcyjny, membranowy z piezorezysto- rami	388
11.3.3.	Czujnik wilgotności impedancyjny	389
11.3.4.	Przetworniki chlorolitowe	394
11.3.5.	Higrometr punktu rosy	396
11.3.6.	Higrometr z przetwornikiem psychrometrycznym . .	402
11.3.7.	Higrometry spektrometryczne	406
11.4.	Pomiary wilgotności ciał stałych	409
11.4.1.	Miary i metody pomiaru wilgotności ciał stałych . .	409
11.4.2.	Metody impedancyjne	411
11.4.3.	Higrometr spektrometryczny	417
11.4.4.	Higrometry mikrofalowe	418