

Przedmowa	13
1. Wiadomości ogólne	17
1.1. Metrologia i jej podział	17
1.2. Metrologia wielkości geometrycznych, jej przedmiot i zadania	20
1.3. Jednostka miary długości	21
1.4. Jednostka miary kąta płaskiego	27
1.5. Matematyka w metrologii wielkości geometrycznych	28
1.5.1. Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej	28
1.5.2. Elementy analizy regresji i teorii aproksymacji	41
1.5.3. Elementy geometrii analitycznej	47
1.6. Podstawy cyfrowej techniki pomiarowej	50
Literatura	50
2. Błędy pomiarów	52
2.1. Jakościowa i ilościowa definicja błędu pomiaru	52
2.2. Błędy systematyczne	54
2.2.1. Likwidacja źródła błędu systematycznego	55
2.2.2. Kompensacja błędów systematycznych	66
2.2.3. Korekcja błędu systematycznego polegająca na doświadczalnym wyznaczeniu poprawki przez zmianę przyczyny błędu	66
2.2.4. Korekcja błędu systematycznego polegająca na obliczeniu poprawki na podstawie wartości wielkości wpływających	66
2.2.5. Błędy systematyczne w pomiarach metodą pośrednią	67
2.2.6. Błędy obserwacji	67
2.3. Błędy przypadkowe	72
2.3.1. Błędy przypadkowe w pomiarach pośrednich równej dokładności	73
2.4. Wyznaczanie niepewności pomiaru	74
2.4.1. Wyznaczanie niepewności pomiaru wg zaleceń ISO	78
2.4.2. Złożona niepewność standardowa	81
2.4.3. Niepewność rozszerzona	81
2.5. Błędy nadmierne	93
2.6. Opracowanie wyniku pomiaru	93
Literatura	93
3. Klasyfikacja i właściwości metrologiczne przyrządów pomiarowych i wzorców miar	95
3.1. Klasyfikacja przyrządów pomiarowych i wzorców miar	95
3.2. Najważniejsze właściwości i charakterystyki przyrządów pomiarowych	97
Literatura	101
4. Wzorce długości i kąta	102
4.1. Klasyfikacja wzorców miar długości	102
4.2. Wzorce kreskowe i końcowo-kreskowe	103
4.2.1. Noniusz	103
4.2.2. Mikroskop odczytowy ze spiralą Archimedesesa	105

4.2.3. Układ odczytowy z urządzeniem projekcyjnym i czujnikiem fotooptycznym	106
4.2.4. Mikroskop odczytowy pryzmatyczny	107
4.3. Inkrementalne układy pomiarowe długości	108
4.3.1. Układy pomiarowe optoelektroniczne	109
4.3.2. Układy pomiarowe magnetyczne, indukcyjne i pojemnościowe	118
4.3.3. Interpolatory	119
4.4. Układy bezwzględne	122
4.4.1. Kodowe układy pomiarowe	122
4.4.2. Układy bezwzględne z siatkami inkrementalnymi	123
4.4.3. Układy bezwzględne ze ścieżką z siatką inkrementalną i ścieżką z kodem losowym (random code) firmy Heidenhain	124
4.5. Wzorce końcowe	124
4.5.1. Płytki wzorcowe	124
4.5.2. Waleczki pomiarowe	128
4.5.3. Kulki pomiarowe	129
4.5.4. Szczelinomierze	129
4.5.5. Wzorce nastawcze	130
4.6. Wzorce falowe	130
4.7. Wzorce kreskowe kąta	131
4.8. Inkrementalne układy pomiarowe kąta	132
4.9. Kodowe układy pomiarowe kąta	134
4.10. Wzorce końcowe kąta.	134
4.10.1. Pryzma wielościenna	134
4.10.2. Płytki kątowe	134
4.10.3. Kątowniki	136
Literatura	136
5. Przyrządy suwmiarkowe, mikrometryczne i czujniki	138
5.1. Przyrządy suwmiarkowe	138
5.2. Przyrządy mikrometryczne	140
5.3. Czujniki	144
5.3.1. Czujniki mechaniczne	145
5.3.2. Czujniki optyczno-mechaniczne	151
5.3.3. Czujniki elektryczne	152
5.3.4. Czujniki pneumatyczne	155
5.3.5. Czujniki inkrementalne	158
5.4. Mechanizacja i automatyzacja pomiarów	159
Literatura	160
6. Maszyny pomiarowe	161
6.1. Wiadomości wstępne	161
6.2. Długościomierze i wysokościomierze	161
6.2.1. Długościomierze pionowe Abbego (Zeiss)	161
6.2.2. Długościomierze poziome uniwersalne	163
6.2.3. Wysokościomierze	164
6.3. Optoelektroniczne przyrządy pomiarowe	167
6.4. Mikroskopy pomiarowe i projektory	171
6.4.1. Mikroskopy warsztatowe małe	175

6.4.2. Mikroskopy warsztatowe duże	176
6.4.3. Mikroskopy uniwersalne	177
6.4.4. Projektory	180
Literatura	182
7. Interferometry	183
7.1. Wiadomości wstępne	183
7.2. Interferometry laserowe	183
7.2.1. Interferometr laserowy HP 5528A (Hewlett-Packard)	186
7.2.2. Modułowy układ pomiarowy HP 5527A (Hewlett-Packard)	190
7.2.3. Interferometr laserowy HP 5529A do kalibracji dynamicznej	191
7.2.4. Interferometr laserowy ZLM 500 (Zeiss)	192
7.2.5. Interferometr laserowy ILM 1131 (Heidenhain)	193
Literatura	194
8. Nadzorowanie przyrządów pomiarowych i obrabiarek	196
8.1. Wiadomości wstępne	196
8.2. Sprawdzanie prostych przyrządów pomiarowych	197
8.2.1. Sprawdzanie przyrządów suwmiarkowych	198
8.2.2. Sprawdzanie przyrządów mikrometrycznych	198
8.2.3. Sprawdzanie czujników	199
8.2.4. Sprawdzanie płytek wzorcowych	200
8.3. Sprawdzanie współrzędnościowych maszyn pomiarowych	201
8.3.1. Sprawdzanie maszyn pomiarowych według EN ISO 10360-2	202
8.3.2. Sprawdzanie maszyn pomiarowych ze stołem obrotowym według PN-EN ISO 10360-3	207
8.3.3. Sprawdzanie maszyn pomiarowych według PN-EN ISO 10360- 4	207
8.3.4. Sprawdzanie maszyn pomiarowych według PN-EN ISO 10360- 5	209
8.3.5. Sprawdzanie maszyn pomiarowych przy użyciu wzorca płytkowego z kulami lub otworami	211
8.4. Sprawdzanie innych przyrządów pomiarowych	212
8.5. Oprogramowanie wspomagające nadzorowanie przyrządów pomiarowych	213
8.6. Nadzorowanie obrabiarek	213
Literatura	214
9. Dobór przyrządów pomiarowych i reguły orzekania zgodności i niezgodności z tolerancją (ze specyfikacją)	218
9.1. Postępowanie pomiarowe	218
9.2. Metody pomiarowe.	218
9.3. Zasada pomiaru	220
9.4. Dobór przyrządów pomiarowych	220
9.5. Niepewność pomiaru a tolerancja wymiaru	221
9.5.1. Kontrola wyrobów za pomocą pomiarów	222
Literatura	224
10. Pomiary wałków, otworów, wymiarów mieszanych i pośrednich	226

10.1. Wiadomości wstępne	226
10.2. Modele opisu postaci geometrycznej wyrobu	226
10.3. Układ tolerancji wałków i otworów	227
10.4. Zasady tolerowania	232
10.5. Wymiarowanie i tolerowanie wektorowe	234
10.6. Pomiary przyrządami suwmiarkowymi	235
10.7. Pomiary przyrządami mikrometrycznymi	235
10.8. Pomiary czujnikami	236
10.9. Pomiary długościomierzami uniwersalnymi i pionowymi	240
10.10. Pomiary mikroskopami pomiarowymi	241
10.11. Sprawdziany	245
Literatura	246
11. Pomiary kątów i stożków	248
11.1. Układ tolerancji kątów	248
11.2. Układ tolerancji i pasowań stożków	249
11.2.1. Wymiarowanie i tolerowanie stożków	249
11.2.2. Tolerancje i pasowania stożków	251
11.3. Pomiary kątów	255
11.3.1. Pomiary kątomierzami	255
11.3.2. Głowice i stoły podziałowe	256
11.3.3. Liniały sinusowe	256
11.3.4. Pomiary mikroskopami	258
11.3.5. Luneta autokolimacyjna	259
11.3.6. Goniometr	259
11.3.7. Poziomnice	260
11.4. Pomiary stożków	262
11.4.1. Pomiary stożka zewnętrznego mikroskopem pomiarowym	262
11.4.2. Pomiary stożka zewnętrznego przy użyciu wałeczków pomiarowych	262
11.4.3. Pomiary stożka wewnętrznego przy użyciu kul pomiarowych	264
11.4.4. Przyrządy do pomiaru stożków	267
11.4.5. Sprawdziany do stożków	268
Literatura	269
12. Współrzędnościowe maszyny pomiarowe	270
12.1. Wiadomości wstępne	270
12.2. Współrzędnościowa technika pomiarowa	271
12.2.1. Istota współrzędnościowej techniki pomiarowej	271
12.2.2. Parametryzacja elementów geometrycznych	272
12.2.3. Algorytmy wyznaczania elementów skojarzonych	275
12.2.4. Elementy teoretyczne i relacje między elementami geometrycznymi	278
12.3. Budowa współrzędnościowych maszyn pomiarowych	281
12.3.1. Układy pomiarowe	281
12.3.2. Układy sterowania	281
12.4. Struktura mechaniczna	282
12.4.1. Klasyfikacja	282
12.4.2. Elementy i zespoły	284
12.5. Zespół głowicy pomiarowej	285

12.5.1. Głowice pomiarowe	285
12.5.2. Układy trzpieni pomiarowych	288
12.6. Wyposażenie maszyn pomiarowych	289
12.7. Komputer i oprogramowanie pomiarowe	291
12.7.1. Kwalifikacja układów trzpieni pomiarowych	292
12.7.2. Układ współrzędnych przedmiotu	292
12.7.3. Analiza wyników pomiaru	293
12.7.4. Programowanie przebiegu pomiarowego CNC	293
12.8. Strategia pomiaru	296
12.9. Dokładność maszyn pomiarowych	299
12.9.1. Źródła błędów	299
12.9.2. Model dokładności geometrycznej	301
12.9.3. Wpływ temperatury i gradientów temperatur	301
12.9.4. Matematyczna korekcja dokładności (CAA) — model statyczny	301
12.9.5. Matematyczna korekcja dokładności — model dynamiczny	304
12.9.6. Błędy wynikające z oprogramowania	305
12.9.7. Wyznaczanie niepewności pomiaru — metoda porównawcza	307
12.9.8. Wyznaczanie niepewności pomiaru — model wirtualny	307
12.10. Przykłady maszyn pomiarowych	309
Literatura	316
13. Pomiary odchyłek geometrycznych	321
13.1. Tolerancje geometryczne	321
13.1.1. Klasyfikacja i pojęcia podstawowe	321
13.1.2. Tolerancje kształtu	324
13.1.3. Bazy	326
13.1.4. Tolerancje kierunku	326
13.1.5. Tolerancje położenia	328
13.1.6. Tolerancje bicia	331
13.1.7. Tolerancje zależne. Zasada maksimum materiału	333
13.1.8. Tolerancje geometryczne ogólne	333
13.2. Ogólne zasady pomiarów odchyłek geometrycznych	335
13.3. Pomiary odchyłki prostoliniowości	338
13.3.1. Wzorce prostoliniowości	338
13.3.2. Klasyfikacja sposobów pomiarów odchyłki prostoliniowości	339
13.3.3. Pomiary odchyłki prostoliniowości w płaszczyźnie z wykorzystaniem wzorca w postaci wiązki światła	339
13.3.4. Wyznaczanie odchyłki prostoliniowości na podstawie wyników pomiarów nachylenia zarysu	340
13.3.5. Pomiary odchyłki prostoliniowości osi w przestrzeni	340
13.3.6. Pomiary odchyłki prostoliniowości oraz odchyłek kształtu wyznaczonego zarysu i kształtu wyznaczonej powierzchni	341
13.4. Pomiary odchyłki płaskości.	341
13.5. Pomiary odchyłki kształtu kuli	343
13.6. Pomiary odchyłki okrągłości	344
13.6.1. Metody bezodniesieniowe	345
13.6.2. Metody odniesieniowe	348
13.7. Pomiary odchyłki walcowości	351

13.8. Pomiary odchyłek geometrycznych współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi	352
13.9. Sprawdziany kierunku, położenia i prostoliniowości osi	356
Literatura	357
14. Pomiary chropowatości i falistości powierzchni	360
14.1. Wiadomości wstępne	360
14.2. Pojęcia podstawowe	361
14.3. Parametry profilu, chropowatości i falistości powierzchni	362
14.3.1. Parametry pionowe	363
14.3.2. Parametry poziome	365
14.3.3. Parametry mieszane	365
14.3.4. Charakterystyczne krzywe i związane z nimi parametry	365
14.3.5. Znormalizowane warunki pomiarów profilu	366
14.3.6. Parametry metody motywów	367
14.3.7. Parametry powierzchni o warstwowych właściwościach funkcjonalnych	370
14.3.8. Parametry nie zdefiniowane w normach PN, EN i ISO	373
14.4. Oznaczanie chropowatości i falistości powierzchni na rysunkach	374
14.5. Klasyfikacja pomiarów chropowatości i falistości powierzchni	376
14.6. Pomiary stykowe przy użyciu profilometrów	377
14.6.1. Zasada pomiaru	377
14.6.2. Głowice pomiarowe	379
14.6.3. Filtry i zespoły opracowujące informację pomiarową	383
14.6.4. Rejestratory	384
14.6.5. Klasyfikacja profilometrów	384
14.6.6. Przegląd profilometrów	385
14.6.7. Źródła błędów w pomiarach stykowych	385
14.6.8. Wzorcowanie profilometrów	387
14.6.9. Zasady oceny chropowatości powierzchni mierzonej metodą stykową	390
14.6.10. Pomiary profilometryczne wiązką zogniskowaną	392
14.7. Pomiary profilometryczne wiązką zogniskowaną	393
14.8. Pomiary optyczne metodą przekroju świetlnego	395
14.9. Pomiary interferencyjne	396
14.10. Pomiary przez porównanie z wzorcami chropowatości powierzchni obrabianych	397
14.11. Inne metody pomiaru chropowatości powierzchni	398
Literatura	399
15. Pomiary gwintów	403
15.1. Układ tolerancji i pasowań gwintów metrycznych walcowych	403
15.1.1. Wiadomości wstępne	403
15.1.2. Opis i parametry postaci geometrycznej gwintu metrycznego walcowego	403
15.1.3. Układ tolerancji i pasowań gwintów metrycznych walcowych ogólnego przeznaczenia z pasowaniem luźnym	405
15.2. Pomiary gwintów walcowych zewnętrznych o zarysie symetrycznym	406

15.2.1. Pomiar średnicy zewnętrznej	406
15.2.2. Pomiar średnicy wewnętrznej	406
15.2.3. Pomiar podziałki	407
15.2.4. Pomiary kąta gwintu i kątów boków	409
15.2.5. Pomiar średnicy podziałowej za pomocą mikroskopu pomiarowego	412
15.2.6. Pomiar średnicy podziałowej sposobem trójwałeczkowym	415
15.3. Pomiary gwintów walcowych wewnętrznych	422
15.3.1. Pomiar średnicy podziałowej gwintu wewnętrznego za pomocą wkładek z rowkami pryzmatycznymi i długościomierza uniwersalnego firmy Zeiss	422
15.3.2. Pomiar średnicy podziałowej przy użyciu sztywnego trzpienia z końcówkami pomiarowymi firmy Mahr lub Zeiss	427
15.4. Pomiary gwintów walcowych symetrycznych ogólnego przeznaczenia	429
15.4.1. Pomiary gwintów zewnętrznych i wewnętrznych	429
15.4.2. Interpretacja tolerancji średnicy podziałowej gwintów ogólnego przeznaczenia	429
15.5. Pomiary gwintów stożkowych o zarysie symetrycznym względem prostopadłej do osi gwintu	430
15.5.1. Konstrukcja zarysu ostrego gwintu stożkowego o dwusiecznych kątów gwintu prostopadłych do osi gwintu	430
15.5.2. Średnica podziałowa	431
15.5.3. Pomiar kąta gwintu	432
15.5.4. Pomiar podziałki	432
15.5.5. Pomiar średnicy podziałowej mikroskopem pomiarowym	433
15.5.6. Pomiar kąta stożka	434
15.6. Pomiary gwintów stożkowych o zarysie symetrycznym względem prostopadłej do tworzącej stożka	434
15.6.1. Konstrukcja zarysu ostrego gwintu stożkowego o dwusiecznych kątów gwintu prostopadłych do tworzących stożka	434
15.6.2. Średnica podziałowa	435
15.6.3. Pomiar kąta gwintu	435
15.6.4. Pomiar podziałki	435
15.6.5. Pomiar średnicy podziałowej sposobem trójwałeczkowym	436
15.7. Pomiary gwintów współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi	437
15.7.1. Pomiary metodą stykową	437
15.7.2. Pomiary metodą optyczną	440
Literatura	442
16. Pomiary kół zębatach	445
6.1. Parametry opisujące postać konstrukcyjną koła zębatego	445
16.2. Definicje i pomiary wybranych odchyłek kół zębatach	447
16.2.1. Odchyłki kinematyczne	447
16.2.2. Pomiary odchyłek podziałki	449
16.2.3. Odchyłka bicia promieniowego uzębienia	451
16.2.4. Pomiar odchyłek promieniowych złożonych	453
16.2.5. Odchyłka podziałki przyporu .454	
16.2.6. Odchyłki zarysu	455

16.2.7. Odchyłki linii zęba	457
16.2.8. Pomiar grubości zęba — pomiar po łuku	458
16.2.9. Pomiar grubości zęba — pomiar cięciwy	458
16.2.10. Pomiar grubości zęba — pomiar długości pomiarowej	458
16.2.11. Pomiar grubości zęba — pomiar przez wałeczki lub kulki	459
16.3. Układ tolerancji przekładni i kół zębatych	460
Literatura	462
17. Metody statystyczne w zapewnieniu jakości	465
17.1. Wiadomości wstępne	465
17.2. Karty kontrolne	468
17.3. Karty kontrolne Shewarta	473
17.3.1. Karty kontrolne przy liczbowej ocenie właściwości	474
17.3.2. Karty wartości średniej $\bar{X}$ i rozstępu-R lub odchylenia standardowego	475
17.3.3. Karty kontrolne pojedynczych obserwacji	475
17.3.4. Karty kontrolne mediany Me	476
17.4. Zmienność własna i całkowita procesu	476
17.5. Środki techniczne statystycznego sterowania procesem	477
Literatura	478
Skorowidz	481
Dodatek. Kolorowe ilustracje przyrządów pomiarowych	489