

Spis treści

Przedmowa.....	13
1. Wiomości 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.	Wałeczki 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 katowe.....	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.....1.	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 płytowego 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.	Główce 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 podziałkowej za pomocą mikroskopu pomiarowego.....	412
15.2.6.	Pomiar średnicy podziałkowej 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 trój wałeczkowym.....	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
6.2.	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 przypora.....	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 zębatach.....	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

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 trój wałeczkowym	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
6.2.	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 zębatach	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-/? 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