

Spis treści

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 przyzmatyczny	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 projekторы	171
6.4.1.	Mikroskopy warsztatowe małe	175
6.4.2.	Mikroskopy warsztatowe duże	176
6.4.3.	Mikroskopy uniwersalne	177
6.4.4.	Projekторы	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. Pomiarów 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. Pomiarów 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
<hr/>		
14.	Pomiary chropowatości i falistości powierzchni.....	360
<hr/>		
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
<hr/>		
15.	Pomiary gwintów	403
<hr/>		
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 przyzmatycznymi 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 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- 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
--	-----
