

# Spis treści

<b>OD AUTORÓW</b> . . . . .	.11
<b>1. EKSPLOATACJA MASZYN I TRANSFORMATORÓW</b> . . . . .	.17
1.1. Rodzaje eksploatacji . . . . .	.19
1.2. Czas życia maszyn i transformatorów oraz ich podział . . . . .	.26
1.3. Awaryjność w przemyśle i energetyce . . . . .	.29
1.3.1. Wskaźniki niezawodnościowe i eksploatacyjne krajowych bloków energetycznych . . . . .	.29
1.3.2. Analiza awaryjności maszyn w krajowych elektrowniach . . . . .	.31
1.3.3. Awaryjność maszyn potrzeb własnych . . . . .	.37
1.4. Cyberbezpieczeństwo przemysłowe . . . . .	.39
1.5. Utrzymanie ruchu maszyn i urządzeń . . . . .	.45
Literatura do rozdziału pierwszego . . . . .	.47
<b>2. DIAGNOSTYKA MASZYN I URZĄDZEŃ-UWAGI OGÓLNE</b> . . . . .	.51
2.1. Diagnostyka techniczna maszyn . . . . .	.52
2.2. Symptomy uszkodzeń - zagadnienia ogólne . . . . .	.55
2.3. Diagnostyka eksploatacyjna w przemyśle i energetyce . . . . .	.57
2.4. Podstawy badań diagnostycznych . . . . .	.63
2.5. Analiza sygnałów diagnostycznych - zagadnienia wybrane . . . . .	.68
2.6. Elementy analizy sygnałów . . . . .	.68
2.6.1. Sygnały zdeterminowane . . . . .	.69
2.6.2. Sygnały losowe . . . . .	.76
2.6.3. Identyfikacja sygnałów . . . . .	.77
2.7. Czujniki pomiarowe w diagnostyce . . . . .	.79
2.7.1. Czujniki do pomiarów drgań bezwzględnych . . . . .	.79
2.7.2. Czujniki do pomiarów drgań względnych . . . . .	.86
2.7.3. Czujniki do pomiarów prądu . . . . .	.91
2.7.4. Czujniki do pomiarów temperatury . . . . .	.99
2.7.5. Czujniki do pomiarów wyładowań niezupełnych . . . . .	.104
2.7.6. Czujniki do pomiarów akustycznych . . . . .	.117
2.8. Aparatura pomiarowa . . . . .	.120
2.8.1. Aparatura do pomiarów i analizy sygnału napięciowego, prądowego, drganiowego, akustycznego i temperatury . . . . .	.120

## 6 i Spis treści

2.8.2.	Aparatura do pomiarów stanu izolacji uzwojeń off-line	130
2.8.3.	Aparatura do badań pakietu i stanu zaklinowania	145
2.8.4.	Aparatura do pomiarów ustawienia zespołów maszynowych	148
2.9.	Diagnostyka off-line	154
2.9.1.	Stanowisko pomiarowe na stacji prób	154
2.10.	Diagnostyka on-line (monitoring)	159
2.11.	Jednolity system nadzoru maszyn w przedsiębiorstwie	159
	Literatura do rozdziału drugiego	163
<b>3.</b>	<b>FUNDAMENTY I KONSTRUKCJE WSPORCZE, USTAWIANIE MASZYN</b>	<b>173</b>
3.1.	Uwagi ogólne	174
3.2.	Kryteria formalne szkodliwego oddziaływania drgań	177
3.3.	Rezonanse	179
3.3.1.	Drgania swobodne	179
3.3.2.	Drgania wymuszone	183
3.3.3.	Badania własne	187
3.4.	Wizualizacja drgań jako użyteczna technika diagnozowania	189
3.5.	Ocena wizualna fundamentów	194
3.6.	Ustawianie zespołów maszynowych	195
3.6.1.	Uwagi ogólne	195
3.6.2.	Nieosiowość w układach napędowych	198
3.6.3.	Wpływ fundamentu na rozosiowanie	201
3.6.4.	Temperatura jako czynnik wpływający na prawidłowość osiowania	203
3.6.5.	Sprzęgła - wpływ na dokładność osiowania	205
3.6.6.	Dopuszczalne odchyłki osiowania	207
3.6.7.	Metody pomiaru osiowości	208
3.6.8.	Wykrywanie niecentryczności zespołu maszynowego w sygnale prądowym	212
3.6.9.	Przykłady pomiarów diagnostycznych	214
	Literatura do rozdziału trzeciego	215
<b>4.</b>	<b>DIAGNOSTYKA DRGANIOWA MASZYN I ZESPOŁÓW MASZYNOWYCH</b>	<b>218</b>
4.1.	Niewywaga, uwagi ogólne	219
4.2.	Przyczyny niewywagi, rodzaje niewywagi	224
4.3.	Metody wyważania wirników sztywnych	235
4.3.1.	Wyważanie jednopłaszczyznowe	236
4.3.2.	Wyważanie dwupłaszczyznowe	240
4.3.3.	Wyważanie on-line	241
4.4.	Metoda wyważania wirników gibkich	243
4.5.	Luzy	248
4.6.	Wygięty wał	250
4.7.	Krzywy wał	251
4.8.	Przycieranie	252
4.9.	Uszkodzenia łożysk tocznych i ich przyczyny	252
4.10.	Diagnostyka łożysk tocznych	259
4.10.1.	Wykorzystanie amplitudowych dyskryminant bezwymiarowych procesów wibroakustycznych	260
4.10.2.	Metoda SPM (ang. shock pulse method)	262
4.10.3.	Wykorzystanie wytycznych producenta	265

4.10.4. Metoda detekcji obwiedni . . . . .	266
4.10.5. Monitoring łożysk tocznych w przemyśle . . . . .	282
4.11. Łożyska ślizgowe w silnikach . . . . .	284
4.11.1. Uszkodzenia i zakłócenia w pracy łożysk ślizgowych . . . . .	286
4.11.2. Diagnostyka łożysk ślizgowych w silnikach . . . . .	289
Literatura do rozdziału czwartego . . . . .	295
<b>5. DIAGNOSTYKA UZWOJEŃ . . . . .</b>	<b>301</b>
<b>5.1. Wstęp . . . . .</b>	<b>301</b>
5.2. Pomiar rezystancji uzwojeń . . . . .	302
5.2.1. Metodyka pomiaru . . . . .	302
5.2.2. Przebiegi nieustalone . . . . .	304
5.3. Badanie układów izolacyjnych uzwojeń napięciem przemiennym . . . . .	311
5.3.1. Informacje ogólne . . . . .	311
5.4. Diagnostyka izolacji uzwojenia napięciem stałym . . . . .	319
5.4.1. Nazwa metody . . . . .	319
5.4.2. Diagnostyka izolacji uzwojeń napięciem stałym . . . . .	319
5.4.3. Postępująca w czasie degradacja układu izolacyjnego maszyn . . . . .	329
5.4.4. Metoda na podstawie pomiarów PI, C, SV, DD - test Meggera . . . . .	331
5.4.5. Diagnostyka izolacji zwojowej . . . . .	336
5.5. Badanie wyładowań niezupełnych w izolacji uzwojeń . . . . .	342
5.5.1. Zjawisko wyładowań niezupełnych . . . . .	342
5.5.2. Badanie wyładowań niezupełnych off-line . . . . .	344
5.5.3. Badanie wyładowań niezupełnych on-line . . . . .	348
5.6. Porównanie metod diagnostycznych: napięciem stałym i wyładowań niezupełnych . . . . .	364
5.6.1. Badane maszyny elektryczne . . . . .	364
5.6.2. Wyniki badań wyładowań niezupełnych off-line . . . . .	365
5.6.3. Wyniki badań diagnostycznych izolacji napięciem stałym . . . . .	367
Literatura do rozdziału piątego . . . . .	370
<b>6. TRANSFORMATORY . . . . .</b>	<b>373</b>
<b>6.1. Wstęp . . . . .</b>	<b>373</b>
6.2. Pomiary podstawowe . . . . .	374
6.2.1. Sprawdzenie poprawności oznaczeń . . . . .	374
6.2.2. Charakterystyki stanu jałowego . . . . .	376
6.2.3. Charakterystyki stanu zwarcia . . . . .	377
6.2.4. Schemat zastępczy i moc rozpraszana w transformatorze . . . . .	378
6.2.5. Próba izolacji napięciem udarowym . . . . .	380
6.3. Oddziaływanie przepięć na układ izolacyjny transformatora . . . . .	380
6.3.1. Rozkład fali napięciowej na uzwojeniu transformatora . . . . .	380
6.4. Pomiar parametrów układu izolacyjnego transformatora . . . . .	386
6.4.1. Metodyka realizacji pomiarów . . . . .	387
6.4.2. Przykład pomiarowy . . . . .	388
6.5. Diagnostyka transformatorów . . . . .	394
6.5.1. Diagnostyka off-line oparta na badaniach okresowych oleju . . . . .	394
6.5.2. Diagnostyka transformatora na podstawie parametrów układu izolacyjnego . . . . .	400
6.6. Diagnostyka przełącznika zaczepów . . . . .	406

## 8 i Spis treści

6.7.	Diagnostyka izolatorów przepustowych . . . . .	408
6.7.1.	Budowa izolatora przepustowego typu OPI . . . . .	408
6.7.2.	Elektryczny schemat zastępczy izolatora przepustowego. . . . .	409
6.7.3.	Jak dochodzi do zwarcia w izolatorze przepustowym . . . . .	411
6.7.4.	Diagnostyka izolatorów przepustowych . . . . .	413
6.8.	Pomiar drgań i hałasu transformatora . . . . .	417
6.9.	Przykładowe awarie transformatorów w eksploatacji . . . . .	418
6.9.1.	Awaria transformatora blokowego. . . . .	418
6.9.2.	Awaria transformatora sieciowego . . . . .	424
6.9.3.	Awaria transformatora hutniczego . . . . .	431
	Literatura do rozdziału szóstego . . . . .	436
<b>7.</b>	<b>MASZYNY INDUKCYJNE . . . . .</b>	<b>438</b>
7.1.	Eksploatacja silników indukcyjnych . . . . .	438
7.2.	Warunki eksploatacji silników indukcyjnych i ich wpływ na uszkodzenia . . . . .	439
7.2.1.	Rozruch silników indukcyjnych pierścieniowych . . . . .	440
7.2.2.	Rozruchy bezpośrednie silników indukcyjnych klatkowych . . . . .	444
7.2.3.	Wpływ uszkodzonych prętów wirnika na charakterystykę mechaniczną silnika . . . . .	449
7.2.4.	Wpływ niesymetrii wirnika na drgania silnika . . . . .	450
7.3.	Charakterystyczne zaburzenia i awarie silników indukcyjnych . . . . .	451
7.3.1.	Rozruch przerywany. . . . .	452
7.3.2.	Wpływ warunków eksploatacji na uszkodzenie uzwojenia klatkowego. . . . .	454
7.3.3.	Statystyka uszkodzeń silników indukcyjnych . . . . .	456
7.4.	Diagnostyka uzwojenia klatkowego wirnika . . . . .	458
7.4.1.	Diagnostyka na podstawie zarejestrowanego prądu rozruchowego silnika . . . . .	459
7.4.2.	Diagnostyka na podstawie zarejestrowanego prądu obciążenia . . . . .	461
7.4.3.	Diagnostyka na podstawie analizy harmonicznej drgań . . . . .	472
7.4.4.	Diagnozowanie uzwojenia klatkowego przy wyjętym wirniku . . . . .	472
7.5.	Diagnostyka niesymetrii szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem a wirnikiem . . . . .	473
7.6.	Prądy łożyskowe. . . . .	478
7.7.	Zapobieganie prądom łożyskowym . . . . .	485
	Literatura do rozdziału siódmego. . . . .	487
<b>8.</b>	<b>MASZYNY SYNCHRONICZNE . . . . .</b>	<b>489</b>
8.1.	Wstęp . . . . .	489
8.2.	Schemat zastępczy i parametry maszyny synchronicznej. . . . .	490
8.3.	Reaktancje synchroniczne i elektromagnetyczne stałe czasowe w stanach nieustalonych. . . . .	492
8.4.	Zasady poprawnej eksploatacji maszyn synchronicznych . . . . .	495
8.4.1.	Opis strefek eksploatacji maszyn synchronicznych . . . . .	495
8.4.2.	Przykładowa instrukcja stanowiskowa hydrogenerators . . . . .	497
8.5.	Diagnostyka i ocena stanu technicznego generatora . . . . .	498
8.5.1.	Diagnostyka uzwojenia i rdzenia stojana generatora . . . . .	499
8.5.2.	Diagnostyka uzwojenia wirnika . . . . .	499
8.5.3.	Diagnostyka pierścieni ślizgowych i szczotek . . . . .	501

8.6. Diagnostyka wirników silników synchronicznych . . . . .	501
8.7. Charakterystyczne zaburzenia i stany awaryjne . . . . .	506
8.8. Awaria wyłącznika- awaria bloku elektroenergetycznego. . . . .	508
8.9. Awaria układu elektromechanicznego z silnikiem synchronicznym. . . . .	511
Literatura do rozdziału ósmego. . . . .	512
<b>9. MASZYNY KOMUTATOROWE PRĄDU STAŁEGO. . . . .</b>	<b>513</b>
9.1. Problemy eksploatacyjne maszyn prądu stałego. . . . .	513
9.1.1. Komutacja prądu twornika . . . . .	513
9.1.2. Przyczyny iskrzenia szczotek . . . . .	515
9.2. Ustawienie szczotek w strefie neutralnej. . . . .	517
9.3. Badanie stabilności kontaktu ślizgowego szczotki z komutatorem. . . . .	521
9.4. Symetria elektryczna i magnetyczna . . . . .	522
9.5. Sprawdzenie obwodu magnetycznego biegunów komutacyjnych. . . . .	526
9.5.1. Strefa komutacji beziskrowej. . . . .	526
9.5.2. Charakterystyka zwarcia / $\neq f(I_k)$ przy $I_f = 0$ . . . . .	528
9.5.3. Korekta parametrów biegunów komutacyjnych. . . . .	529
9.5.4. Bocznikowanie uzwojenia B1C2 indukcyjnością . . . . .	531
9.5.5. Ocena właściwości komutacyjnych szczotek . . . . .	533
9.6. Komutacja w silnikach prądu stałego pracujących przy odwzbudzeniu . . . . .	534
9.7. Zabezpieczenie silników prądu stałego. . . . .	538
9.8. Diagnostyka on-line iskrzenia szczotek w maszynach prądu stałego. . . . .	547
9.9. Czynniki determinujące iskrzenie szczotek przy komutacji prądu pulsującego. . . . .	548
9.10. Połączenie uzwojenia wirnika z komutatorem -chorągiewki . . . . .	554
9.11. Uszkodzenia mechaniczne osadzenia pakietu blach wirnika . . . . .	560
Literatura do rozdziału dziewiątego. . . . .	563
<b>10. ORGANIZACJA SŁUŻB DIAGNOSTYCZNYCH W PRZEMYŚLE I ENERGETYCE ..</b>	<b>564</b>
10.1. Zadania służb diagnostycznych. . . . .	564
10.2. Miejsce służb diagnostycznych w strukturach przedsiębiorstwa . . . . .	565
10.3. Liczebność służb diagnostycznych. . . . .	567
10.4. Wyposażenie Laboratorium Diagnostyki Maszyn . . . . .	567
Literatura do rozdziału dziesiątego. . . . .	569
<b>U.UWAGI KOŃCOWE . . . . .</b>	<b>571</b>