

## Spis treści

Przedmowa .....	9
Wykaz ważniejszych oznaczeń .....	13
1. Wprowadzenie .....	15
1.1. Podstawowe problemy diagnostyki obiektów przemysłowych .....	15
1.2. Podstawowe zagadnienia monitorowania i diagnostyki silników indukcyjnych .....	21
1.3. Zastosowanie modeli matematycznych do diagnostyki silników indukcyjnych .....	24
1.4. Diagnostyka silników indukcyjnych oparta na analizie sygnałów pomiarowych .....	26
1.5. Diagnostyka silników indukcyjnych z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji .....	27
1.6. Podsumowanie .....	28
Literatura .....	29
2. Przegląd podstawowych uszkodzeń napędów z silnikiem indukcyjnym .....	31
2.1. Rodzaje, przyczyny i statystyka uszkodzeń silników indukcyjnych .....	31
2.2. Uszkodzenia uzwojeń wirników klatkowych .....	34
2.3. Uszkodzenia uzwojeń stojana .....	36
2.4. Uszkodzenia mechaniczne .....	39
2.5. Specyficzne uszkodzenia przekształtnikowych układów napędowych z silnikiem indukcyjnym .....	42
2.6. Podsumowanie .....	46
Literatura .....	47
3. Charakterystyka sygnałów diagnostycznych .....	49
3.1. Wielkości elektryczne i mechaniczne stosowane w diagnostyce układów napędowych .....	49
3.2. Prąd stojana jako sygnał diagnostyczny .....	52
3.3. Moc chwilowa, strumień stojana i wirnika oraz moment elektromagnetyczny jako sygnały diagnostyczne .....	54
3.4. Sygnały chwilowej mocy czynnej i biernej .....	57
3.5. Sygnał strumienia poosiowego .....	58
3.6. Sygnał drgań mechanicznych .....	60
3.7. Temperatura jako sygnał diagnostyczny .....	64
3.8. Podsumowanie .....	67
Literatura .....	67
4. Analiza sygnałów – podstawowa metoda diagnostyki napędu elektrycznego .....	71
4.1. Wprowadzenie .....	71
4.2. Wstępne przetwarzanie sygnałów .....	73
4.3. Dobór i konfiguracja cyfrowego systemu akwizycji danych .....	77
4.4. Nieparametryczne metody wyznaczania cech sygnałów diagnostycznych .....	80
4.4.1. Transformata Fouriera .....	80
4.4.2. Krótkoczasowa transformata Fouriera STFT .....	88
4.4.3. Przekształcenie falkowe .....	90
4.4.4. Transformaty wyższych rzędów .....	96

4.5. Podsumowanie .....	101
Literatura .....	101
5. Modele matematyczne silnika indukcyjnego z uszkodzeniem .....	103
5.1. Podstawowy model obwodowy silnika indukcyjnego .....	103
5.2. Model silnika indukcyjnego ze zwartymi zwojami w uzwojeniu stojana .....	108
5.2.1. Model uwzględniający dodatkową macierz asymetrii w równaniach stanu .....	108
5.2.2. Model uwzględniający wektorowy współczynnik uszkodzenia .....	111
5.2.3. Model wykorzystujący modyfikację parametrów schematu zastępczego silnika .....	112
5.2.4. Weryfikacja modeli matematycznych silnika indukcyjnego z uszkodzonym stojaniem .....	114
5.3. Modele matematyczne silnika indukcyjnego z uszkodzonym uzwojeniem wirnika klatkowego .....	115
5.3.1. Model I .....	115
5.3.2. Model II .....	118
5.4. Modele polowo-obwodowe silnika indukcyjnego z uszkodzonym stojaniem .....	121
5.5. Posumowanie .....	127
Literatura .....	127
6. Estymatory zmiennych stanu i parametrów w diagnostyce napędów przekształtnikowych .....	131
6.1. Wprowadzenie .....	131
6.2. Algorytm rozszerzonego filtru Kalmana .....	134
6.2.1. Podstawowy model matematyczny filtru Kalmana .....	134
6.2.2. Estymacja rezystancji wirnika .....	135
6.2.3. Estymacja rezystancji stojana .....	137
6.3. Algorytm obserwatora Luenbergera .....	138
6.3.1. Podstawowy model matematyczny obserwatora Luenbergera .....	138
6.3.2. Estymacja rezystancji wirnika .....	140
6.3.3. Estymacja rezystancji stojana .....	141
6.4. Zastosowanie filtru Kalmana do wykrywania uszkodzeń w układzie wektorowego sterowania prędkością DFOC .....	142
6.4.1. Wykrywanie uszkodzeń wirnika klatkowego .....	142
6.4.2. Wykrywanie uszkodzeń stojana .....	146
6.5. Zastosowanie obserwatora Luenbergera do wykrywania uszkodzeń w układzie wektorowego sterowania prędkością DFOC .....	147
6.5.1. Wykrywanie uszkodzeń wirnika klatkowego .....	147
6.5.2. Wykrywanie uszkodzeń stojana .....	149
6.6. Podsumowanie .....	151
Literatura .....	151
7. Metody sztucznej inteligencji w diagnostyce .....	155
7.1. Wprowadzenie .....	155
7.2. Podstawowe informacje o sieciach neuronowych .....	157
7.3. Sieci neuronowe w diagnostyce .....	163
7.4. Metodyka uczenia i testowania neuronowych detektorów uszkodzeń .....	166
7.5. Metody logiki rozmytej w diagnostyce .....	173
7.6. Wstępne przetwarzanie sygnałów pomiarowych dla neuronowych detektorów uszkodzeń .....	176
7.7. Sieci neuronowe radialne RBF .....	180
7.8. Sieci neuronowe typu GRNN .....	183
7.9. Sieci neuronowo-rozmyte .....	186
7.10. Podsumowanie .....	189

Literatura .....	190
8. Wykrywanie uszkodzeń wirników klatkowych silnika indukcyjnego zasilanego z sieci i przemiennika częstotliwości .....	193
8.1. Charakterystyka zjawisk w silniku indukcyjnym z uszkodzonym wirnikiem klatkowym ...	193
8.2. Wykrywanie uszkodzeń wirnika na podstawie analizy widmowej prądu stojana .....	196
8.3. Wykrywanie uszkodzeń wirnika na podstawie analizy widmowej modułu wektora prądu stojana .....	203
8.4. Neuronowe detektory uszkodzeń wirnika .....	207
8.4.1. Charakterystyka badań .....	207
8.4.2. Perceptronowy detektor uszkodzeń wirników klatkowych .....	209
8.4.3. Detektor uszkodzeń wirników klatkowych oparty na sieci radialnej .....	217
8.4.4. Detektor uszkodzeń wirników klatkowych oparty na sieci neuronowo-rozmytej .....	220
8.4.5. Detektor uszkodzeń wirników klatkowych oparty na sieci MLP trenowanej danymi z analizy falkowej .....	223
8.5. Podsumowanie .....	234
Literatura .....	235
9. Wykrywanie zwarc zwojowych w stojanie silnika indukcyjnego zasilanego z sieci i przemiennika częstotliwości .....	237
9.1. Metody wykrywania uszkodzeń w stojanie .....	237
9.2. Symptomy zwarc zwojowych w stojanie silnika indukcyjnego zasilanego z przemiennika częstotliwości .....	239
9.2.1. Symptomy zwarc zwojowych w prądzie stojana .....	239
9.2.2. Symptomy zwarc zwojowych w wektorze przestrzennym prądu stojana .....	242
9.2.3. Zastosowanie hodografu wektora przestrzennego prądu stojana do wykrywania zwarc zwojowych w stojanie .....	247
9.2.4. Wykrywanie zwarc zwojowych na podstawie analizy przesunięcia kąowego między prądami fazowymi oraz prądem i napięciem stojana .....	252
9.2.5. Symptomy zwarc zwojowych w strumieniu poosiowym .....	256
9.2.6. Symptomy zwarc zwojowych w sygnałach mocy chwilowej i momentu elektromagnetycznego .....	260
9.2.7. Symptomy zwarc zwojowych w drganiach mechanicznych .....	263
9.3. Zastosowanie składowych symetrycznych do wykrywania zwarc zwojowych w silniku zasilanym z przemiennika częstotliwości .....	264
9.4. Neuronowe detektory uszkodzeń uzwojenia stojana .....	269
9.4.1. Neuronowy detektor uszkodzeń stojana oparty na danych z analizy PCA wektora przestrzennego prądu stojana .....	269
9.4.2. Neuronowy detektor uszkodzeń stojana oparty na danych z analizy składowych symetrycznych .....	274
9.5. Zastosowanie analizy falkowej do wykrywania zwarc zwojowych .....	276
9.6. Podsumowanie .....	281
Literatura .....	282
10. Wykrywanie uszkodzeń mechanicznych napędu z silnikiem indukcyjnym .....	285
10.1. Wprowadzenie .....	285
10.2. Wykrywanie uszkodzenia łożyska tocznego .....	288
10.2.1. Metody klasyczne oparte na analizie widmowej drgań i prądu .....	288
10.2.2. Metody wykrywania uszkodzenia łożyska tocznego oparta na analizie falkowej .....	297
10.3. Wykrywanie nieosiowości napędu z silnikiem indukcyjnym .....	301
10.4. Monitorowanie ekscentryczności maszyny .....	305

---

10.5. Neuronowe detektory uszkodzeń łożysk tocznych .....	314
10.5.1. Perceptronowy detektor uszkodzeń łożysk tocznych silnika zasilanego z prze- miennika częstotliwości .....	314
10.5.2. Detektor neuronowy wykorzystujący radialną sieć neuronową .....	317
10.5.3. Detektor neuronowy wykorzystujący analizę falkową .....	323
10.6. Neuronowe detektory nieosiowości napędu .....	325
10.7. Neuronowe detektory ekscentryczności silnika .....	329
10.8. Podsumowanie .....	331
Literatura .....	332
11. Zagadnienia realizacji praktycznej systemów diagnostycznych .....	335
11.1. Wprowadzenie .....	335
11.2. Przenośny system diagnostyczny silnika indukcyjnego .....	336
11.3. Komputerowy system do monitorowania i diagnostyki uzwojenia stojana .....	345
11.4. Komputerowy system do monitorowania i diagnostyki uszkodzeń mechanicznych .....	350
11.5. Komputerowy system do monitorowania i diagnostyki uzwojeń stojana i wirnika oparty na estymacji parametrów .....	354
Literatura .....	356
Załącznik 1. Parametry badanych silników .....	359
Załącznik 2. Schematy ideowe stanowisk badawczych .....	363