

## SPIS RZECZY

Przedmowa . . . . .	11
Wykaz oznaczeń . . . . .	13

### 1. Zasada działania silnika indukcyjnego asynchronicznego

1.1. Wstęp . . . . .	19
1.2. Składowe części silnika . . . . .	19
1.3. Wirujące pole magnetyczne . . . . .	20
1.4. Zmiana kierunku obrotów pola . . . . .	24
1.5. Pola wirujące wielobiegunowe . . . . .	24
1.6. Siły elektromotoryczne i prądy w wirniku . . . . .	25
1.7. Poślizg . . . . .	26
1.8. Trzy rodzaje pracy maszyny asynchronicznej . . . . .	26
1.9. Wzajemne oddziaływanie stojana i wirnika . . . . .	28

### 2. Uzwojenia silników asynchronicznych

2.1. Zasada działania uzwojeń prądu zmiennego . . . . .	32
2.2. Klasyfikacja uzwojeń . . . . .	35
2.3. Uzwojenia jednowarstwowe o całkowitej liczbie zębów na biegun i fazę . . . . .	39
2.3.1. Uzwojenia dwupiętrowe . . . . .	39
2.3.2. Uzwojenia trójpętrowe . . . . .	42
2.3.3. Uzwojenia koszykowe . . . . .	42
2.4. Współczynniki uzwojenia . . . . .	44
2.4.1. Współczynnik grupy . . . . .	45
2.4.2. Współczynnik skrócenia . . . . .	46
2.4.3. Całkowity współczynnik uzwojenia . . . . .	47
2.5. Uzwojenia dwuwarstwowe . . . . .	47
2.5.1. Rozważania ogólne . . . . .	47
2.5.2. Uzwojenia pętlicowe dwuwarstwowe prądu zmiennego . . . . .	47
2.5.3. Uzwojenia faliste dwuwarstwowe prądu zmiennego . . . . .	48
2.6. Porównanie uzwojeń jednowarstwowych i dwuwarstwowych . . . . .	51
2.7. Uzwojenia z $q$ ułamekownym . . . . .	52
2.7.1. Warunki symetrii uzwojeń ułamekownych . . . . .	52
2.7.2. Przykłady uzwojeń ułamekownych symetrycznych . . . . .	54
2.8. Uzwojenia wirników zwartych . . . . .	56

### 3. Pole wirujące uzwojeń wielofazowych

3.1. Siły magnetomotoryczne . . . . .	58
3.2. Siła magnetomotoryczna dla $q=1$ . . . . .	58
3.3. Siła magnetomotoryczna dla $q>1$ . . . . .	59

3.4. Siła magnetomotoryczna trzech faz . . . . .	61
3.5. Analiza matematyczna sił magnetomotorycznych . . . . .	64
3.6. Obliczanie prądu magnesującego . . . . .	68
3.6.1. Szczelina powietrzna . . . . .	72
3.6.2. Zęby stojana . . . . .	73
3.6.3. Zęby wirnika . . . . .	77
3.6.4. Jarzmo stojana . . . . .	77
3.6.5. Jarzmo wirnika . . . . .	77

#### 4. Siły elektromotoryczne indukowane w uzwojeniach

4.1. Podział pól magnetycznych na pola główne i pola rozproszenia . . .	80
4.2. Siły elektromotoryczne wzniecane strumieniem głównym . . . . .	80
4.3. Siły elektromotoryczne przy większej liczbie żłobków na biegun i fazę	82
4.4. Współczynniki uzwojenia dla wyższych harmonicznych . . . . .	83
4.5. Sprowadzanie uzwojeń wirnika do obwodu stojana . . . . .	86
4.6. Siły elektromotoryczne pól rozproszenia . . . . .	88

#### 5. Silnik asynchroniczny z wirnikiem nieruchomym

5.1. Silnik z wirnikiem nieruchomym otwartym . . . . .	91
5.2. Silnik z wirnikiem nieruchomym zwartym . . . . .	93
5.3. Nieruchomy silnik z wirnikiem zwartym przez oporności . . . . .	97
5.4. Regulator indukcyjny . . . . .	100

#### 6. Silnik asynchroniczny w ruchu

6.1. Prądy w obwodzie wirnika i wykres wektorowy w tym obwodzie . . .	104
6.2. Sumowanie sił magnetomotorycznych . . . . .	106
6.3. Wykres wektorowy dla obwodu stojana . . . . .	106
6.4. Całkowity wykres wektorowy . . . . .	107
6.5. Sprowadzanie wykresów do częstotliwości $f_1$ . . . . .	108
6.6. Stosunki energetyczne . . . . .	109
6.7. Schematy zastępcze silnika asynchronicznego . . . . .	111

#### 7. Moment obrotowy silnika asynchronicznego

7.1. Wyprowadzenie wzoru na moment na podstawie siły obwodowej . . .	115
7.2. Wyprowadzenie wzoru na moment metodą energetyczną . . . . .	121
7.2.1. Wykres energetyczny silnika asynchronicznego . . . . .	121
7.2.2. Moment . . . . .	123
7.3. Moment w funkcji poślizgu dla różnych oporów w obwodzie wirnika. Moment maksymalny i odpowiadający mu poślizg . . . . .	125
7.4. Wzór Klossa . . . . .	133
7.5. Wielkość momentu rozruchowego w zależności od oporności w obwo- dzie wirnika . . . . .	135

#### 8. Wpływ wyższych harmonicznych pola wirującego na moment silnika asynchronicznego

8.1. Wyższe harmoniczne smm. wirującej . . . . .	137
8.2. Momenty asynchroniczne wywołane wyższymi harmonicznymi smm. . .	140
8.3. Momenty synchroniczne . . . . .	145

8.4. Wibracje i hałasowanie . . . . .	147
8.5. Sposoby zmniejszania momentów wywołanych wyższymi harmonicznymi pola . . . . .	148

### 9. Wykres kołowy silnika asynchronicznego na podstawie uproszczonego schematu zastępczego

9.1. Przekształcenie wykresu wektorowego silnika . . . . .	150
9.2. Wyprowadzenie wykresu kołowego . . . . .	153
9.3. Wnioski z wykresu kołowego . . . . .	155
9.4. Sporządzanie wykresu kołowego . . . . .	165
9.5. Przykład zastosowania wykresu kołowego . . . . .	166
9.6. Obliczenie zmienności strumienia . . . . .	168

### 10. Dokładny schemat zastępczy i wykres kołowy silnika asynchronicznego

10.1. Omówienie nieuproszczonego schematu zastępczego . . . . .	173
10.2. Ustalenie wykresu prądowego na podstawie stanu jałowego i stanu zwarcia . . . . .	175
10.3. Określenie mocy i sprawności z wykresu kołowego . . . . .	181

### 11. Silniki asynchroniczne klatkowe

11.1. Silnik z klatką zwykłą . . . . .	184
11.2. Silniki wieloklatkowe . . . . .	192
11.3. Wnioski . . . . .	203
11.4. Silniki głębokożłobkowe . . . . .	204

### 12. Rozruch silników asynchronicznych

12.1. Uwagi ogólne. Rozruch przy bezpośrednim włączeniu do sieci . . . . .	218
12.2. Rozruch silników pierścieniowych . . . . .	220
12.3. Obliczanie rozrusznika . . . . .	222
12.4. Rozruch silników klatkowych . . . . .	225
12.4.1. Rozruch za pomocą autotransformatora . . . . .	226
12.4.2. Zastosowanie oporów czynnych w obwodzie stojana . . . . .	227
12.4.3. Rozruch za pomocą oporności biernych w obwodzie stojana . . . . .	228
12.4.4. Rozruch za pomocą przelącznika gwiazda-trójkąt . . . . .	228
12.4.5. Sprzęgło odśrodkowe . . . . .	231
12.5. Rozruch silnika Görgesa . . . . .	232

### 13. Regulacja obrotów silników asynchronicznych trójfazowych

13.1. Wstęp . . . . .	234
13.2. Zmiana częstotliwości $f_1$ . . . . .	236
13.3. Zmiana liczby par biegunów $p$ . . . . .	243
13.4. Silnik z wirnikiem pośrednim . . . . .	256
13.5. Silnik dwustronnie zasilany . . . . .	257
13.6. Zwiększenie oporności $R_2$ wirnika . . . . .	259
13.7. Regulacja obrotów przez zmianę napięcia $U_1$ . . . . .	264
13.8. Układy kaskadowe z maszynami komutatorowymi . . . . .	268
13.9. Kaskada silników pierścieniowych . . . . .	274
13.10. Regulacja obrotów przez hamowanie prądem stałym . . . . .	276

13.11. Układy niesymetryczne . . . . .	278
13.12. Sprzężenie mechaniczne dwóch silników . . . . .	283
13.13. Wnioski . . . . .	285

#### 14. Prądnica asynchroniczna

14.1. Zasada działania . . . . .	286
14.2. Wykres kołowy prądnicy asynchronicznej . . . . .	288
14.3. Wykres wektorowy prądnicy asynchronicznej . . . . .	288
14.4. Porównanie z prądnicą synchroniczną . . . . .	289
14.5. Prądnica asynchroniczna samowzbudna . . . . .	291

#### 15. Hamowanie silników asynchronicznych

15.1. Uwagi ogólne . . . . .	294
15.2. Hamowanie prądnicowe . . . . .	294
15.3. Hamowanie prądem zwrotnym . . . . .	296
15.4. Hamowanie przy zastosowaniu prądu stałego . . . . .	297
15.5. Hamowanie przy zastosowaniu dwóch silników asynchronicznych . . . . .	300
15.6. Hamowanie przy zastosowaniu układów niesymetrycznych w obwodzie stojana . . . . .	301

#### 16. Silniki asynchroniczne jednofazowe

16.1. Uwagi ogólne . . . . .	305
16.2. Teoria silnika jednofazowego . . . . .	306
16.3. Schematy rozruchowe silnika jednofazowego . . . . .	315
16.3.1. Silniki z fazą pomocniczą zasilaną z tego samego źródła napięcia co faza główna . . . . .	315
16.3.2. Silniki ze zwartą fazą pomocniczą . . . . .	317

#### 17. Oporności indukcyjne rozproszenia w silniku asynchronicznym

17.1. Wstęp . . . . .	319
17.2. Oporność indukcyjna stojana lub wirnika wywołana strumieniem roz- proszczenia żłobkowego . . . . .	320
17.3. Oporność indukcyjna wywołana strumieniem rozproszenia połączeń czołowych . . . . .	324
17.4. Oporność indukcyjna wywołana strumieniem rozproszenia pomiędzy główkami zębów . . . . .	325
17.5. Całkowita oporność indukcyjna rozproszenia stojana i wirnika . . . . .	327

#### 18. Straty, sprawność, nagrzewanie

18.1. Straty . . . . .	330
18.1.1. Straty w miedzi . . . . .	330
18.1.2. Straty w żelazie . . . . .	333
18.1.3. Straty dodatkowe w żelazie . . . . .	336
18.1.4. Straty mechaniczne . . . . .	339
18.1.5. Całkowite straty . . . . .	339
18.2. Sprawność . . . . .	339
18.3. Nagrzewanie . . . . .	340

**19. Obliczanie silników asynchronicznych trójfazowych**

19.1. Obliczenie silnika pierścieniowego . . . . .	341
19.1.1. Obliczenie wymiarów głównych . . . . .	341
19.1.2. Uzwojenie stojana . . . . .	344
19.1.3. Uzwojenie wirnika pierścieniowego . . . . .	350
19.1.4. Obliczenie prądu magnesującego . . . . .	354
19.1.5. Obliczenie prądu zwarcia . . . . .	359
19.1.6. Straty i sprawność silnika . . . . .	362
19.1.7. Sprawdzenie gęstości prądu i okładu prądowego ze względu na nagrzewanie silnika . . . . .	363
19.1.8. Zestawienie danych potrzebnych do sporządzenia wykresu kołowego . . . . .	364
19.2. Obliczenie silnika z wirnikiem zwartym klatkowym . . . . .	365
19.2.1. Obliczenie wymiarów głównych . . . . .	365
19.2.2. Uzwojenie stojana . . . . .	366
19.2.3. Uzwojenie wirnika . . . . .	368
19.2.4. Obliczenie prądu magnesującego . . . . .	371
19.2.5. Obliczenie prądu zwarcia . . . . .	373
19.2.6. Straty i sprawność . . . . .	374
19.2.7. Zestawienie danych do wykresu kołowego . . . . .	376
19.3. Tablice zestawieniowe podstawowych wielkości maszyn . . . . .	377

**20. Zarys konstrukcji silników asynchronicznych**

20.1. Zakres tematyki rozdziału . . . . .	382
20.2. Blachy czynnej części silników i ich obudowa . . . . .	382
20.3. Wykonywanie kanałów wentylacyjnych i wentylacja silników . . . . .	387
20.4. Pierścienie ślizgowe i urządzenia do zwierania wirnika i podnoszenia szczotek . . . . .	392
20.5. Zasady obliczania wałów silników asynchronicznych . . . . .	395

**21. Zasady seryjnej budowy maszyn asynchronicznych** 397**22. Badania i próby silników asynchronicznych**

22.1. Próby wyboru . . . . .	400
22.1.1. Pomiar oporności uzwojeń . . . . .	400
22.1.2. Pomiar oporności izolacji uzwojeń . . . . .	402
22.1.3. Pomiar przekładni silników pierścieniowych . . . . .	402
22.1.4. Próba biegu jałowego . . . . .	403
22.1.5. Próba zwarcia . . . . .	405
22.1.6. Obliczanie sprawności metodą strat poszczególnych . . . . .	406
22.1.7. Wytrzymałość elektryczna . . . . .	408
22.2. Próba typu . . . . .	408
22.2.1. Próba typu . . . . .	408
22.2.2. Zdjęcie charakterystyki . . . . .	409
22.3. Pomiar poślizgu $s$ . . . . .	411
Bibliografia . . . . .	415
Skorowidz . . . . .	419