

MASZYNY ELEKTRYCZNE WOKÓŁ NAS

Zastosowanie, budowa, modelowanie, charakterystyki, projektowanie

Mieczysław Ronkowski
Michał Michna
Grzegorz Kostro
Filip Kutt

redakcja Mieczysław Ronkowski

Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Romuald Szymkiewicz

RECENZENT
Paweł Staszewski

PROJEKT OKŁADKI
Filip Kutt

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<http://www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG>

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2011

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978–83–7348–401–6

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 15,5, ark. druku 15,0, 982/659

Spis treści

Od Autorów	11
1. Wprowadzenie	15
1.1. Uwagi wstępne	15
1.2. U źródeł maszyn elektrycznych	15
1.3. Dziś i jutro maszyn elektrycznych	17
1.4. Nauczanie maszyn elektrycznych	18
1.5. Podsumowanie	22
1.6. Literatura	22
2. Podstawy fizyczne budowy i działania maszyn elektrycznych	23
2.1. Uwagi wstępne	23
2.2. Definicja maszyny elektrycznej	23
2.3. Ogólna struktura maszyn elektrycznych	25
2.3.1. Struktura mechaniczna	25
2.3.2. Struktura elektromagnetyczna	27
2.4. Maszyna elektryczna a system przetwarzania energii	28
2.5. Zjawiska fizyczne wykorzystane do budowy maszyn elektrycznych	30
2.5.1. Podstawy działania	30
2.5.2. Pole elektromagnetyczne i jego wielkości charakterystyczne	30
2.5.3. Prymitywna maszyna elektryczna a maszyny współczesne	31
2.6. Podsumowanie	38
2.7. Literatura	39
3. Przykładowe zastosowania maszyn elektrycznych we współczesnych systemach elektromechanicznych	42
3.1. Uwagi wstępne	42
3.2. Wprowadzenie	42
3.3. System elektroenergetyczny na pokładzie współczesnego samolotu	43
3.3.1. Koncepcja systemu	43
3.3.2. Budowa trójstopniowego generatora synchronicznego	47
3.3.3. Literatura	50
3.4. System kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej	51
3.4.1. Koncepcja systemu	51
3.4.2. Generatory elektryczne stosowane w systemach micro-CHP	51
3.4.3. Literatura	54
3.5. Współczesne systemy trakcyjne transportu kolejowego	55
3.5.1. System trakcyjny klasyczny – szynowy	55
3.5.2. System trakcyjny niekonwencjonalny – liniowy	62
3.5.3. Literatura	63
3.6. Systemy trakcyjne rowerów	63
3.6.1. Rower elektryczny	63
3.6.2. Literatura	67

3.7. Podsumowanie	68
4. Transformatory	69
4.1. Uwagi wstępne	69
4.2. Formy budowy	69
4.3. Modele fizyczne i obwodowe	72
4.4. Stan jałowy transformatora	75
4.5. Stan obciążenia	78
4.6. Stan zwarcia transformatora	80
4.7. Charakterystyki ruchowe	82
4.7.1. Zmienność napięcia	82
4.7.2. Sprawność	83
4.8. Układy połączeń i przekładania transformatorów trójfazowych	85
4.9. Praca równoległa	87
4.10. Transformatory specjalne	88
4.11. Podsumowanie	88
4.12. Pytania	89
4.13. Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)	89
4.14. Literatura	89
5 Maszyny prądu stałego	91
5.1. Uwagi wstępne	91
5.2. Formy budowy	92
5.3. Model fizyczny i obwodowy	96
5.4. Charakterystyka elektromechaniczna i mechaniczna	102
5.5. Sterowanie prędkością kątową/obrotową	104
5.6. Maszyny specjalne	105
5.7. Podsumowanie	108
5.8. Pytania	108
5.9. Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)	109
5.10. Literatura	109
6. Maszyny synchroniczne	112
6.1. Uwagi wstępne	112
6.2. Formy budowa	112
6.3. Modele fizyczne i obwodowe	119
6.3.1. Założenia modelu	119
6.3.2. Stan jałowy i obciążenia	122
6.3.3. Stan zwarcia	124
6.4. Praca generatorowa w systemie autonomicznym/w sieci elastycznej	127
6.5. Praca generatorowa w systemie energetycznym/w sieci sztywnej	130
6.5.1. Synchronizacja z siecią systemu	130
6.5.2. Stan obciążenia – charakterystyki ruchowe (regulacja mocy czynnej i biernej)	132
6.6. Praca silnikowa maszyny synchronicznej – silnik synchroniczny	136
6.7. Podsumowanie	140
6.8. Pytania	140
6.9. Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)	141
6.10. Literatura	141

7	Maszyny indukcyjne/asynchroniczne	144
7.1.	Uwagi wstępne	144
7.2.	Formy budowy	145
7.3.	Modele fizyczne i obwodowe	147
7.3.1.	Stan jałowy	155
7.3.2.	Stan rozruchowy/zwarcia	156
7.3.3.	Stan obciążenia – charakterystyka mechaniczna (naturalna)	157
7.4.	Sterowanie prędkością kątową/obrotową	159
7.5.	Silniki indukcyjne specjalne	163
7.6.	Podsumowanie	163
7.7.	Pytania	163
7.8.	Zagadnienia obliczeniowe i pomiarowe (laboratoryjne)	164
7.9.	Literatura	164
8.	Maszyny elektryczne specjalne	167
8.1.	Uwagi wstępne	167
8.2.	Silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi	168
8.2.1.	Formy budowy	169
8.2.2.	Rozkład pola magnetycznego	171
8.2.3.	Analiza rozkładu pola	173
8.2.4.	Modele fizyczne i obwodowe	178
8.2.5.	Charakterystyki ruchowe i sterowanie prędkością obrotową	187
8.2.6.	Literatura	194
8.3.	Silniki indukcyjne wielofazowe	196
8.3.1.	Formy budowy	196
8.3.2.	Układy zasilania i zasada sterowania	197
8.3.3.	Charakterystyki ruchowe i sterowanie prędkością obrotową	198
8.3.4.	Podsumowanie	200
8.3.5.	Literatura	200
8.4.	Silniki reluktancyjne przełączalne	200
8.4.1.	Formy budowy	201
8.4.2.	Układy zasilania i zasada sterowania	202
8.4.3.	Modele fizyczne i obwodowe	203
8.4.4.	Literatura	205
8.5.	Silniki o ruchu złożonym	206
8.5.1.	Uwagi ogólne	206
8.5.2.	Formy budowy	207
8.5.3.	Podsumowanie	208
8.5.4.	Literatura	208
9.	Elementy projektowania maszyn elektrycznych. Przykłady obliczeń	209
9.1.	Uwagi wstępne	209
9.2.	Projekt silnika indukcyjnego klatkowego	210
9.2.1.	Dobór wymiarów głównych i szczegółowych silnika	211
9.2.2.	Wizualizacja wyników obliczeń silnika	217
9.2.3.	Wymiary żłobków stojana i wirnika	217
9.2.4.	Wymiary główne maszyny	218
9.2.5.	Uzwojenie stojana silnika	220
9.2.6.	Podsumowanie wyników obliczeń silnika	221
9.2.7.	Literatura	221
9.3.	Projekt silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi	221

9.3.1. Dane wejściowe do obliczeń silnika	221
9.3.2. Materiały magnetyczne trwałe	223
9.3.3. Szczelina powietrzna/robocza silnika	224
9.3.4. Punkt pracy magnesów trwałych silnika	225
9.3.5. Dobór wysokości magnesów trwałych silnika	227
9.3.6. Wysokość jarzma wirnika	228
9.3.7. Sprawdzenie wymiarów wirnika	228
9.3.8. Podsumowanie wyników obliczeń silnika	229
9.3.9. Literatura	229
9.4. Podsumowanie	229
Literatura	230
Książki/podręczniki	230
Skrypty	232
Artykuły/referaty	232
Ważniejsze normy	234
Adresy internetowe	234
Załączniki	236
Wykaz ważniejszych oznaczeń	237