

SPIS TREŚCI

Od Autora	11
Wykaz oznaczeń	13
Część pierwsza. Podstawy matematyczne i fizyczne	
1. Zarys teorii elektromechanicznego przetwarzania energii	21
1.1. Wiadomości ogólne	21
1.2. Charakterystyki magazynów energii	22
1.3. Energia magazynów	24
1.4. Zasada zachowania energii	35
1.4.1. Energia całkowita	35
1.4.2. Zasada zachowania energii z zastosowaniem funkcji Lagrange'a	38
1.4.3. Zasada najmniejszego działania	41
1.4.4. Zasada zachowania energii z zastosowaniem funkcji Hamiltona	42
1.4.5. Interpretacja równań bilansu sił	44
2. Transformacje liniowe w obwodach maszyn elektrycznych i konwencje zapisów	50
2.1. Uwagi ogólne	50
2.2. Transformacja wielkości z układu trzech osi fazowych u, v, w do układu trzech osi składowych symetrycznych $1, 2, 0$	54
2.3. Transformacja wielkości pomiędzy dwoma układami osi nieruchomych	56
2.4. Transformacja wielkości z układu trójfazowego osi u, v, w do układu dwufazowego osi $\alpha, \beta, 0$	57
2.5. Transformacja wielkości z układu dwufazowego osi α, β do układu osi składowych symetrycznych $1, 2$	62
2.6. Transformacja wielkości z układu dwufazowego osi wirujących $\alpha, \beta, 0$ do układu osi nieruchomych prostopadłych $d, q, 0$	63
2.7. Transformacja wielkości z układu trójfazowego osi wirujących u, v, w do układu osi prostopadłych nieruchomych $d, q, 0$, czyli przekształcenie Parka	64
2.8. Konwencje zapisów	66
3. Podstawy fizyczne działania maszyn elektrycznych	69
3.1. Pojęcia podstawowe	69
3.2. Transformatory	72
3.2.1. Zasada budowy	72
3.2.2. Zasada działania	77
3.2.2.1. Napięcia indukowane w stanie jałowym	77
3.2.2.2. Prąd magnesujący	80
3.2.2.3. Straty w stanie jałowym	82

3.2.3.	Transformatory trójfazowe	83
3.2.3.1.	Sposoby łączenia i grupy połączeń	83
3.2.3.2.	Przekładnia	86
3.2.3.3.	Harmoniczne prądu magnesującego i napięcia indukowanego	87
3.2.3.4.	Obciążenie symetryczne	88
3.3.	Maszyny komutatorowe prądu stałego	90
3.3.1.	Zasada budowy	90
3.3.2.	Zasada działania	93
3.4.	Maszyny synchroniczne	96
3.4.1.	Zasada budowy	96
3.4.2.	Zasada działania	103
3.5.	Maszyny indukcyjne	106
3.5.1.	Zasada budowy	106
3.5.2.	Zasada działania	110
3.6.	Pole magnetyczne i uzwojenia maszyn elektrycznych	112
3.6.1.	Opis ogólny	112
3.6.2.	Pole magnetyczne od magnesów trwałych	112
3.6.3.	Pole magnetyczne wytwarzane prądem stałym	113
3.6.3.1.	Pole magnetyczne w maszynach z biegunami wydatnymi	113
3.6.3.2.	Pole magnetyczne w maszynach z biegunami utajonymi	116
3.6.3.3.	Uzwojenia tworników maszyn prądu stałego	117
3.6.3.4.	Pole magnetyczne twornika maszyny prądu stałego	119
3.6.4.	Pole magnetyczne wytwarzane prądem przemiennym	121
3.6.4.1.	Uzwojenia bezkomutatorowe prądu przemiennego	121
3.6.4.2.	Napięcie magnetyczne i indukcja magnetyczna	127
3.6.4.3.	Okład prądu	132
3.7.	Moment elektromagnetyczny	134
3.8.	Napięcie indukowane	135
3.9.	Stan obciążenia maszyn elektrycznych	138
3.9.1.	Uwagi ogólne	138
3.9.2.	Stan obciążenia maszyny indukcyjnej	139
3.9.2.1.	Pole magnetyczne wypadkowe w maszynie indukcyjnej obciążonej	139
3.9.2.2.	Schemat zastępczy i wykres wektorowy maszyny indukcyjnej	142
3.9.3.	Stan obciążenia maszyny prądu stałego	145
3.9.3.1.	Pole magnetyczne wypadkowe maszyny prądu stałego	145
3.9.3.2.	Komutacja	147
3.9.3.3.	Iskrzenie	150
3.9.4.	Stan obciążenia maszyny synchronicznej	152
3.9.4.1.	Napięcie indukowane strumieniem magnesów	152
3.9.4.2.	Reakcja twornika	154
3.9.4.3.	Schemat zastępczy i wykres wektorowy maszyny w stanie nienasyconym	164
3.10.	Wzbudzanie maszyn elektrycznych	174
3.10.1.	Wiadomości ogólne	174
3.10.2.	Wzbudzanie maszyn prądu stałego	174
3.10.3.	Wzbudzanie maszyn synchronicznych	178
3.11.	Oznaczenia końcówek i układy połączeń maszyn elektrycznych	179
4.	Ogólny model maszyny elektrycznej	184
4.1.	Wiadomości ogólne	184
4.2.	Cechy modelu	185
4.3.	Model maszyny	188
4.4.	Indukcyjności i napięcia transformacji i rotacji	190

4.5.	Równania napięć modelu	195
4.6.	Moment elektromagnetyczny	196
4.7.	Równania równowagi	200
4.8.	Sposoby rozwiązywania równań równowagi	201

Część druga. Charakterystyki, parametry i właściwości ruchowe

5.	Transformatory	205
5.1.	Równania równowagi transformatora jednofazowego	205
5.2.	Stan ustalony	212
5.2.1.	Stan jałowy	212
5.2.2.	Stan zwarcia ustalonego symetrycznego	216
5.2.3.	Stan obciążenia ustalonego symetrycznego	220
5.2.4.	Praca równoległa	223
5.2.5.	Obciążenie asymetryczne	225
5.2.6.	Sprawność	227
5.3.	Stan dynamiczny	229
5.3.1.	Zwarcie udarowe	229
5.3.2.	Prąd włączania	234
5.3.3.	Przebiegi	236
5.4.	Transformatory specjalne	241
5.4.1.	Wiadomości ogólne	241
5.4.2.	Transformator trójzwojeniowy	241
5.4.3.	Autotransformator	243
5.4.4.	Transformator prostownikowy	244
6.	Maszyny komutatorowe prądu stałego	248
6.1.	Uwagi ogólne	248
6.2.	Dwuozwojeniowa maszyna komutatorowa prądu stałego	249
6.2.1.	Równania równowagi	249
6.2.2.	Prądnica obcowzbudna	251
6.2.2.1.	Uwagi ogólne	251
6.2.2.2.	Stan ustalony	252
6.2.2.3.	Stan dynamiczny	257
6.2.3.	Silnik obcowzbudny	261
6.2.3.1.	Wiadomości ogólne	261
6.2.3.2.	Stan ustalony	264
6.2.3.3.	Stan dynamiczny	275
6.2.4.	Maszyna bocznikowa	284
6.2.5.	Silnik szeregowy	286
6.2.5.1.	Wiadomości ogólne	286
6.2.5.2.	Stan ustalony	288
6.2.5.3.	Stan dynamiczny	293
6.3.	Maszyna obcowzbudna z dozwojeniem szeregowym	295
6.3.1.	Prądnica obcowzbudna z dozwojeniem szeregowym	295
6.3.1.1.	Równania równowagi	295
6.3.1.2.	Stan ustalony	296
6.3.1.3.	Stan dynamiczny	298
6.3.2.	Silnik obcowzbudny z dozwojeniem szeregowym	300
6.3.2.1.	Równania równowagi	300
6.3.2.2.	Stan ustalony	301
6.3.2.3.	Stan dynamiczny	303

6.4.	Maszyna szeregowo-bocznikowa	303
6.5.	Praca równoległa prądnic prądu stałego	304
6.6.	Maszyna ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym	307
6.7.	Maszyna z wykorzystaniem strumienia poprzecznego	309
6.7.1.	Wiadomości ogólne	309
6.7.2.	Równania równowagi	313
6.7.3.	Metadyna	314
6.7.4.	Amplidyna	317
6.7.4.1.	Równania równowagi	317
6.7.4.2.	Stan ustalony	317
6.7.4.3.	Stan dynamiczny	320
6.8.	Rototrol	322
6.9.	Hamowanie maszynami prądu stałego	323
7.	Maszyny synchroniczne	327
7.1.	Uwagi ogólne	327
7.2.	Indukcyjności elementarne	329
7.3.	Strumienie magnetyczne skojarzone w układzie osi naturalnych i prostopadłych	333
7.4.	Równania równowagi w wartościach bezwzględnych	337
7.5.	Współczynniki sprzężenia i rozproszenia obwodów	343
7.6.	Równania równowagi w wartościach względnych	346
7.7.	Reaktancje przy obciążeniach symetrycznych	357
7.8.	Stan ustalony symetryczny synchroniczny	360
7.8.1.	Uwagi ogólne	360
7.8.2.	Charakterystyka biegu jałowego	366
7.8.3.	Charakterystyki zewnętrzne prądnicy	368
7.8.4.	Charakterystyki regulacyjne	369
7.8.5.	Charakterystyka zwarcia symetrycznego ustalonego	370
7.8.6.	Charakterystyka obciążenia i trójkąt Potiera	373
7.8.7.	Charakterystyki kątowe	374
7.8.8.	Prąd wzbudzenia znamionowy	378
7.8.9.	Praca równoległa prądnic synchronicznych	380
7.8.9.1.	Wiadomości ogólne	380
7.8.9.2.	Synchronizacja	380
7.8.9.3.	Regulacja mocy maszyny synchronicznej współpracującej z siecią sztywną	384
7.8.9.4.	Moment synchronizujący	387
7.8.9.5.	Przeciążalność statyczna	389
7.8.9.6.	Wykres obciążalności turbogeneratora	390
7.8.10.	Silnik synchroniczny	395
7.8.11.	Kompensator synchroniczny	398
7.9.	Stan nieustalony symetryczny prądnicy	399
7.9.1.	Wiadomości ogólne	399
7.9.2.	Zwarcie udarowe symetryczne	400
7.10.	Stan ustalony asymetryczny prądnicy	420
7.10.1.	Wiadomości ogólne	420
7.10.2.	Zwarcie ustalone asymetryczne	423
7.11.	Stabilność	429
7.11.1.	Uwagi ogólne	429
7.11.2.	Badanie stabilności statycznej metodą małych przyrostów	429
7.11.2.1.	Układ równań	429
7.11.2.2.	Równanie charakterystyczne i jego pierwiastki	432
7.11.2.3.	Postać kanoniczna równania charakterystycznego	435

7.11.2.4.	Wyrażenie na małe odchylenia wirnika	438
7.11.2.5.	Warunki stabilności statycznej na podstawie analizy wyrażenia na małe odchylenia wirnika	440
7.11.2.6.	Częstotliwość kołysań wirnika	443
7.11.3.	Uwagi o innych metodach badania stabilności statycznej	444
7.11.4.	Uwagi o metodach badania stabilności dynamicznej	445
8.	Maszyny indukcyjne	447
8.1.	Wiadomości ogólne	447
8.2.	Model maszyny indukcyjnej	448
8.3.	Stan ustalony	452
8.3.1.	Równania ogólne	452
8.3.2.	Równania z zastosowaniem składowych symetrycznych	453
8.3.3.	Bieg jałowy	466
8.3.4.	Stan zwarcia	467
8.3.5.	Bilans mocy i sprawność silnika indukcyjnego	469
8.3.6.	Moment elektromagnetyczny przy pracy symetrycznej	472
8.3.6.1.	Moment elektromagnetyczny od pierwszej harmonicznej indukcji i okładu	472
8.3.6.2.	Momenty pasożytnicze	474
8.3.6.3.	Zależność momentu od rezystancji wirnika, napięcia i częstotliwości	480
8.3.7.	Silniki klatkowe	482
8.3.8.	Wykres pracy	485
8.3.9.	Rozruch silnika indukcyjnego	488
8.3.10.	Charakterystyki robocze silnika indukcyjnego	492
8.3.11.	Regulacja prędkości silników indukcyjnych	494
8.3.11.1.	Wiadomości ogólne	494
8.3.11.2.	Regulacja prędkości przez zmianę liczby par biegunów	494
8.3.11.3.	Regulacja prędkości przez zmianę częstotliwości	496
8.3.11.4.	Regulacja prędkości przez zmianę poślizgu	497
8.3.12.	Prądnicą indukcyjną	503
8.3.13.	Hamowanie maszynami indukcyjnymi	503
8.3.14.	Silniki indukcyjne jednofazowe	504
8.3.15.	Silniki liniowe	510
8.3.15.1.	Zasada działania i konstrukcji	510
8.3.15.2.	Siła elektromagnetyczna	512
8.3.15.3.	Równania ruchu	513
8.3.15.4.	Zastosowania	515
8.3.16.	Regulator indukcyjny	515
8.3.17.	Przesuwnik fazowy	517
8.3.18.	Silnik indukcyjny dwustronnie zasilany	517
8.3.19.	Wał elektryczny	519
8.3.20.	Sprzęgło elektromagnetyczne	520
8.4.	Stan dynamiczny	520
9.	Stan asynchroniczny maszyny synchronicznej	527
9.1.	Wiadomości ogólne	527
9.2.	Charakterystyki częstotliwościowe	527
9.2.1.	Zależności podstawowe	527
9.2.2.	Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych i reaktancji na podstawie krzywej zanikania prądu stałego	532
9.3.	Moment i moc w stanie asynchronicznym	541

SPIS TREŚCI

10.	Maszyny komutatorowe prądu przemiennego	544
10.1.	Wiadomości ogólne	544
10.2.	Komutator jako przetwornica częstotliwości	544
10.3.	Silnik Schragego	546
10.4.	Silnik komutatorowy szeregowy trójfazowy	550
10.5.	Silnik komutatorowy jednofazowy	553
11.	Elektromaszynowe elementy automatyki	556
11.1.	Wiadomości ogólne	556
11.2.	Silniki wykonawcze	556
11.2.1.	Silniki wykonawcze prądu stałego	556
11.2.2.	Silniki wykonawcze indukcyjne	565
11.3.	Prądnice tachometryczne	569
11.3.1.	Wiadomości ogólne	569
11.3.2.	Prądnice tachometryczne prądu stałego	570
11.3.3.	Prądnice tachometryczne synchroniczne	573
11.3.4.	Prądnice tachometryczne indukcyjne dwufazowe	573
11.4.	Przetworniki położenia	575
11.4.1.	Transformatory położenia kąтового	575
11.4.2.	Selsyny	577
Literatura		583
Skorowidz		584