

SPIS RZECZY

Wykaz tablic	13
Oznaczenia	15
Przedmowa do wydania I	29
Przedmowa do wydania II	29
Wstęp	31
1. Prawa elektromagnetyczne a budowa maszyn prądu stałego	33
1.1. Zasadnicze prawa elektromagnetyczne w zastosowaniu do maszyn elektrycz- nych	33
1.1.1. Prawo przepływu	33
1.1.2. Prawo indukcji elektromagnetycznej	35
1.1.3. Siły wywierane w polu magnetycznym na przewod z prądem	40
1.2. Budowa maszyn prądu stałego	41
2. Uzwojenia tworników maszyn prądu stałego	43
2.1. Uzwojenie pierścieniowe	43
2.1.1. Uzwojenie pierścieniowe maszyny dwubiegunowej	43
2.1.2. Uzwojenie pierścieniowe maszyny czterobiegunowej	46
2.2. Uzwojenia bębnowe	47
2.2.1. Numeracja i oznaczenia w uzwojeniach bębnowych	48
2.2.2. Podział uzwojeń bębnowych	51
2.3. Uzwojenia pętlicowe proste	53
2.4. Symetria uzwojeń	57
2.5. Uzwojenie pętlicowe wielokrotne	64
2.6. Uzwojenie faliste proste (szeregowe)	67
2.7. Uzwojenie faliste wielokrotne (szeregowo-równoległe)	72
2.8. Gwiazda i wielobok napięć	75
2.9. Gwiazda i wielobok dla uzwojeń pierścieniowych	75
2.9.1. Gwiazda i wielobok napięć uzwojenia pierścieniowego dwubiegunowego	75
2.9.2. Gwiazda i wielobok napięć uzwojenia pierścieniowego wielobiegunowego	79
2.10. Gwiazda i wielobok napięć uzwojeń bębnowych	81
2.10.1. Gwiazda i wielobok napięć uzwojeń bębnowych, $u = 2$	81
2.10.2. Gwiazda i wielobok napięć uzwojeń bębnowych, $u > 2$	90
2.10.3. Gwiazda i wielobok napięć uzwojeń schodkowych	95
2.11. Połączenia wyrównawcze w uzwojeniach	99
2.11.1. Połączenia wyrównawcze pierwszego rodzaju	99
2.11.2. Połączenia wyrównawcze drugiego rodzaju	102
2.12. Warunki występowania punktów jednakowego potencjału w jednostron- nym wieloboku napięć	107
2.13. Dwustronny wielobok napięć	114
2.13.1. Pojęcia ogólne	114
2.13.2. Warunek uzyskania wspólnych punktów w dwustronnym wielo- boku napięć uzwojenia pętlicowego dwukrotnego	116
2.13.3. Warunek uzyskania wspólnych punktów w dwustronnym wielo- boku napięć uzwojenia falistego dwukrotnego	121

2.14.	Warunki występowania punktów jednakowego potencjału w dwustronnym wieloboku napięć	124
2.15.	Połączenia wyrównawcze między punktami wieloboków dwustronnych (trzeciego rodzaju)	128
2.15.1.	Połączenia wyrównawcze trzeciego rodzaju w uzwojeniach pętlicowych dwukrotnych	128
2.15.2.	Połączenia wyrównawcze trzeciego rodzaju w uzwojeniach falistych wielokrotnych	129
2.16.	Połączenia wyrównawcze drugiego rodzaju, nieprawidłowe.	130
2.17.	Prawidłowe połączenia wyrównawcze trzeciego rodzaju w uzwojeniach falistych wielokrotnych	133
2.17.1.	Nieprawidłowe działanie połączeń wyrównawczych trzeciego rodzaju	133
2.17.2.	Największa możliwa liczba prawidłowych połączeń wyrównawczych trzeciego rodzaju	136
2.17.3.	Prawidłowe połączenia wyrównawcze trzeciego rodzaju, rozłożone symetrycznie	137
2.17.4.	Rachunkowy sposób sprawdzenia prawidłowości symetrycznie rozłożonych połączeń wyrównawczych trzeciego rodzaju	141
2.18.	Uzwojenie pętlicowo-faliste	144
2.18.1.	Zasada działania uzwojenia pętlicowo-falistego	144
2.18.2.	Warunki dla uzwojeń sprzężonych	146
2.18.3.	Uzwojenia pętlicowo-faliste dla $u = 2$ z uzwojeniem pętlicowym prostym	149
2.18.4.	Warunki dla prawidłowego uzwojenia pętlicowo-falistego przy $u \geq 2$, $m \geq 1$, nieschodkowego	153
2.18.5.	Interpretacja geometryczna warunków wykonalności uzwojenia pętlicowo-falistego z rozpatrzenia gwiazdy napięć boków	164
2.19.	Uzwojenia pętlicowo-faliste schodkowe	166
2.20.	Uzwojenia faliste nieprawidłowe	171
2.20.1.	Przyczyny stosowania uzwojeń falistych nieprawidłowych	171
2.20.2.	Uzwojenie z martwymi prętami	171
2.20.3.	Uzwojenie ze sztucznym połączeniem	183
3.	Własności twornika maszyn prądu stałego	189
3.1.	SEM wzbudzona w maszynie prądu stałego	189
3.2.	Okład prądu twornika	191
3.3.	Moment obrotowy maszyny prądu stałego.	192
3.4.	Rodzaje połączeń maszyn prądu stałego	193
3.5.	Napięcie na zaciskach maszyny prądu stałego a SEM	194
4.	Pole magnetyczne w maszynie prądu stałego	198
4.1.	Obwód magnetyczny maszyny prądu stałego	198
4.2.	Strumień w obwodzie magnetycznym maszyny prądu stałego	200
4.3.	Spadki napięcia magnetycznego (amperozwoje) poszczególnych części obwo- du magnetycznego	202
4.3.1.	Szczelina powietrzna	202
4.3.2.	Zęby twornika	208
4.3.3.	Rdzeń twornika	212
4.3.4.	Magnes	212
4.3.5.	Jarzmo	213
4.4.	Charakterystyka magnesowania	214
4.5.	Samowzbudzanie się prądnic	215

2.1 ✓	4.6.	Oddziaływanie twornika	217
	4.6.1.	Krzywa wzbudzenia pola twornika	217
	4.6.2.	Krzywa pola twornika	220
	4.6.3.	Oddziaływanie twornika a strefa neutralna	221
	4.6.4.	Oddziaływanie twornika przy szczotkach wysuniętych ze strefy neutralnej	223
	4.7.	Podłużne i poprzeczne działanie magnesujące okładu prądu twornika	224
	4.7.1.	Obliczenie przepływu twornika działającego podłużnie	226
	4.7.2.	Obliczenie przepływu twornika działającego poprzecznie	227
	4.7.3.	Całkowity przepływ potrzebny przy obciążeniu maszyny	230
	4.8.	Krzywa potencjalna	230
2.2 ✓	4.9.	Krzywa komutatora	231
	4.10.	Skutki oddziaływania twornika	232
	4.11.	Dopuszczalne napięcie międzywycinkowe	233
2.3 ✓	4.12.	Kompensacja oddziaływania twornika za pomocą biegunów dodatkowych i uzwojenia kompensacyjnego	234
	4.12.1.	Uzwojenie biegunów dodatkowych	234
	4.12.2.	Uzwojenie kompensacyjne	236
	4.13.	Strumień rozproszenia biegunów głównych	237
	4.14.	Strumień rozproszenia biegunów komutacyjnych	240
	5.	Komutacja	241
	5.1.	Komutacja. Uwagi ogólne	241
	5.2.	Komutacja prostoliniowa	242
	5.3.	Wpływ oporu zezwoju na komutację	245
	5.4.	Wpływ na komutację SEM wzbudzonych w zezwoju	247
	5.4.1.	SEM wytworzona przez pole własne zezwoju	248
	5.4.2.	SEM wzbudzone w zezwoju komutującym przez pola obce	250
	5.4.2.1.	SEM pola twornika	250
	5.4.2.2.	SEM pola biegunów pomocniczych (zwrotnych, komutacyjnych)	252
	5.5.	Krzywe potencjalne szczotek	252
	5.6.	Pole magnetyczne potrzebne dla komutacji (pole komutujące)	255
	5.6.1.	SEM samoindukcji pochodząca od pola żłobkowego i pole dla jej skompensowania	256
	5.6.2.	SEM samoindukcji od strumienia dookoła połączeń czołowych Φ_{ct} i pole potrzebne do jej kompensacji	257
	5.7.	Kształt pola komutującego	257
	5.8.	Szerokość strefy komutacyjnej	262
	5.8.1.	Pojęcia ogólne.	262
	5.8.2.	Szerokość strefy komutacyjnej uzwojenia pętlicowego prostego	263
	5.8.3.	Szerokość strefy komutacyjnej uzwojenia pętlicowego wielokrotnego	266
	5.8.4.	Szerokość strefy komutacyjnej uzwojenia falistego wielokrotnego	266
	5.9.	Pole komutujące potrzebne do komutacji przyspieszonej	269
	5.10.	Przewodność strumienia pola własnego zezwoju komutującego	271
	5.10.1.	Strumień pola żłobkowego	271
	5.10.1.1.	Przewodność strumienia przestrzeni żłobkowej Φ_{z1}	272
	5.10.1.2.	Przewodność strumienia między głowicami zębów	274
	5.10.2.	Przewodność strumienia pola dookoła połączeń czołowych	276
	5.10.2.1.	Przewodność dla strumienia stałego Φ'_{ct}	276
	5.10.2.2.	Przewodność dla strumienia lokalnego	279

5.11.	Pole komutujące przy długości biegunów pomocniczych mniejszej niż długość biegunów głównych	281
5.12.	SEM występująca przy komutacji między krawędziami szczotek	282
5.13.	Zjawiska w strefie między szczotką a komutatorem	287
5.14.	Ocena iskrzenia	290
6.	Własności i charakterystyki maszyn prądu stałego	292
6.1.	Schematy maszyn prądu stałego	292
6.2.	Prądnice prądu stałego	296
6.3.	Charakterystyki prądnic prądu stałego	301
6.4.	Praca równoległa prądnic prądu stałego	305
6.4.1.	Maszyny bocznikowe lub z obcym wzbudzeniem	305
6.4.2.	Maszyny szeregowo-bocznikowe	307
6.4.3.	Maszyny szeregowe	307
6.5.	Praca szeregową prądnic prądu stałego	308
6.6.	Podział napięcia systemu Dolivo-Dobrowolskiego	308
6.7.	Silniki prądu stałego	309
6.7.1.	Znaczenie SEM dla pracy silnika	309
6.7.2.	Rodzaje połączeń silników prądu stałego	310
6.8.	Regulacja obrotów silników prądu stałego	315
6.9.	Rozruch silnika	315
6.10.	Zmiana kierunku obrotów	318
6.11.	Przejście od stanu pracy silnikowej do prądnicowej	318
6.12.	Hamowanie silników prądu stałego	318
6.13.	Specjalne układy do regulacji obrotów	319
6.13.1.	Układ Leonarda	319
6.13.2.	Prądnica dodawcza	320
6.13.3.	Przełączenie szeregowe i równoległe	321
6.13.4.	Regulacja obrotów za pomocą sterowanych prostowników z siatką sterowaną	321
7.	Maszyny specjalne prądu stałego	322
7.1.	Maszyna Rosenberga	322
7.2.	Metadyna	324
7.2.1.	Zasada działania metadyny	324
7.2.2.	Praca przetwornicowa metadyny	327
7.2.3.	Metadyna-przetwornica z uzwojeniami regulacyjnymi, stabilizacyjnymi i prądnicą regulacyjną (w układzie krzyżowym)	329
7.2.4.	Metadyna-przetwornica w schemacie ósemkowym	332
7.2.5.	Inne układy metadyn-przetwornic	334
7.2.6.	Metadyna-prądnica	334
7.2.7.	Metadyna-prądnica z uzwojeniami stabilizacyjnymi i regulacyjnymi	335
7.2.8.	Metadyna-silnik	337
7.3.	Wzmacniacze elektromaszynowe (amplidyny)	338
7.3.1.	Pojęcia ogólne	338
7.3.2.	Prądnica obcowzbudna jako wzmacniacz	338
7.3.3.	Wzmacniacz dwustopniowy	342
7.3.4.	Amplidyna	342
7.4.	Prądnica Krāmera	346
7.5.	Rototrole	349
7.5.1.	Zasada działania rototrola	349
7.5.2.	Rototrol bocznikowy	349

7.5.3.	Rototrol jednostopniowy z uzwojeniem szeregowym	350
7.5.4.	Rototrol dwustopniowy	352
7.6.	Prądnicą prądu stałego z rozproszeniem pola	358
7.7.	Maszyny unipolarne	359
8.	Straty w maszynach prądu stałego i sprawność	363
8.1.	Podział strat	363
8.2.	Straty w żelazie	364
8.2.1.	Straty na histerezę	364
8.2.2.	Straty na prądy wirowe	365
8.2.3.	Straty w żelazie twornika	373
8.2.3.1.	Straty w żelazie rdzenia twornika	373
8.2.3.2.	Straty w żelazie zębów	374
8.2.4.	Straty na histerezę i prądy wirowe w nabiegunnikach	375
8.2.5.	Straty na prądy wirowe w uzwojeniu twornika	376
8.2.6.	Straty dodatkowe wskutek wewnętrznych prądów w uzwojeniu twornika	376
8.2.7.	Straty dodatkowe na prądy wirowe w nieizolowanych sworzniach służących do umocowania żelaza twornika	377
8.2.8.	Obliczanie strat dodatkowych	377
8.3.	Straty prądowe	377
8.3.1.	Straty prądowe w uzwojeniu bocznikowym	377
8.3.2.	Straty prądowe w uzwojeniu twornika	378
8.3.3.	Straty na prądy wirowe od prądu twornika w uzwojeniu twornika przy komutacji	380
8.3.4.	Straty prądowe w uzwojeniu szeregowym	384
8.4.	Straty przy przejściu prądu z komutatora do szczotek	384
8.5.	Straty na prądy wirowe wywołane przez prąd twornika w wycinkach komutatora	385
8.6.	Straty wywołane przez prąd twornika wskutek zniekształcenia pola głównego	385
8.7.	Straty mechaniczne	386
8.7.1.	Straty mechaniczne wskutek tarcia w łożyskach i na wentylację (ΔP_m)	386
8.7.1.1.	Straty mechaniczne liczone łącznie	386
8.7.1.2.	Straty mechaniczne liczone oddzielnie dla łożysk i na wentylację	388
8.7.2.	Straty mechaniczne wskutek tarcia szczotek na komutatorze	389
8.8.	Sprawność	389
9.	Równania obwodów maszyn prądu stałego	393
9.1.	Ogólna postać maszyny prądu stałego	393
9.2.	SEM wzbudzone w poszczególnych uzwojeniach maszyny prądu stałego	395
9.2.1.	SEM samoindukcji	395
9.2.2.	SEM indukcji wzajemnej	397
9.2.3.	SEM wzbudzone w uzwojeniu twornika	398
9.2.3.1.	SEM transformacji	398
9.2.3.2.	SEM rotacji	399
9.3.	Równania obwodów maszyny prądu stałego	400
9.4.	Układ jednostek względnych	402
9.5.	Wielkości sprowadzone	404
9.5.	Równania maszyny prądu stałego z wzbudzeniem obcym i szeregowym	406
9.7.	Równanie maszyny prądu stałego o wzbudzeniu szeregowo-bocznikowym	408

9.8. Równania maszyn prądu stałego o wzbudzeniu obcym, bocznikowym i szeregowym	409
9.9. Zastosowanie równań	410
10. Grzanie się maszyn	413
10.1. Krzywe nagrzewania i chłodzenia	413
10.1.1. Ogólne pojęcia i założenia	413
10.1.2. Krzywa nagrzewania	414
10.1.3. Krzywa stygnięcia	415
10.1.4. Własności krzywej nagrzewania i stygnięcia	416
10.1.5. Złożone przebiegi nagrzewania i stygnięcia	421
10.2. Rodzaje pracy maszyny	424
10.2.1. Praca znamionowa ciągła	424
10.2.2. Praca znamionowa dorywcza	424
10.2.3. Praca znamionowa przerywana	425
10.3. Wytrzymałość cieplna izolacji	426
10.4. Rodzaje budowy maszyn elektrycznych	431
10.4.1. Stopnie ochrony przed dotknięciem i obcymi ciałami	431
10.4.2. Stopnie ochrony przed dostępem wody	432
10.4.3. Rodzaje czynnika chłodzącego	432
10.4.4. Sposoby wprowadzenia w ruch czynnika chłodzącego	432
10.4.5. Drogi przepływu czynnika chłodzącego	432
10.4.6. Rodzaje budowy maszyn elektrycznych z punktu widzenia ochrony i sposobu chłodzenia	433
10.5. Przybliżone obliczanie przyrostu temperatury maszyny	433
10.5.1. Obliczanie czynnych powierzchni chłodzenia	435
10.5.1.1. Cewki magnesowe	435
10.5.1.2. Twornik	436
10.5.1.3. Komutator	437
10.5.2. Obliczanie przyrostów temperatur poszczególnych części maszyny prądu stałego	437
10.6. Dokładniejsze obliczanie cieplne maszyn elektrycznych	439
10.6.1. Uwagi ogólne	439
10.6.2. Odprowadzanie ciepła przez konwekcję	440
10.6.3. Odprowadzanie ciepła przez promieniowanie	445
10.6.4. Przewodzenie ciepła przez materiały czynne i izolacyjne	446
10.6.5. Ogólne uwagi o obliczaniu układów cieplnych maszyn elektrycznych	448
10.7. Schematy cieplne maszyn prądu stałego	451
10.7.1. Schemat cieplny biegunów	451
10.7.2. Schemat cieplny twornika z wentylacją osiową	455
10.7.3. Schemat cieplny środkowej wiązki blach długiej maszyny o kanałach promieniowych	459
10.7.4. Schemat cieplny komutatora	462
10.8. Przewietrzanie maszyn elektrycznych	464
10.8.1. Typowe ustroje wentylacji	464
10.8.2. Ilość powietrza chłodzącego	467
10.8.3. Fizyczne podstawy obliczenia wentylacji	469
10.8.4. Straty przy przewietrzaniu	472
10.8.4.1. Straty przy wejściu powietrza ze zbiornika do rury wylotowej	472

10.8.4.2. Straty tarcia przy przejściu przez kanał	473
10.8.4.3. Straty ciśnienia przy zmianie kierunku strumienia powietrza	474
10.8.4.4. Straty ciśnienia przy nagłej zmianie przekroju	475
10.8.4.5. Straty ciśnienia przy przejściu przez siatkę ochronną	476
10.8.5. Obwody wentylacyjne	476
10.8.5.1. Charakterystyka obwodu wentylacyjnego. Stała aerodynamiczna	476
10.8.5.2. Szeregowe połączenie obwodów wentylacyjnych	477
10.8.5.3. Równoległe połączenie dwóch obwodów wentylacyjnych	479
10.8.6. Wentylatory	480
10.8.6.1. Ogólne uwagi	480
10.8.6.2. Ciśnienie wytwarzane przez wentylator odśrodkowy	481
10.8.6.3. Obliczanie wentylatora dla maszyny elektrycznej	484
11. Obliczanie maszyn prądu stałego	487
11.1. Zasadniczy wzór do obliczania maszyn prądu stałego	487
11.2. Uzwojenie twornika	492
11.3. Wymiary żłobka twornika	497
11.4. Izolacja	497
11.4.1. Wytrzymałość dielektryczna izolacji	497
11.4.2. Drut i jego izolacja	499
11.4.3. Gęstość prądu w tworniku	499
11.4.4. Ustrój izolacji żłobka	501
11.4.5. Zapełnienie żłobka	503
11.5. Wymiary zasadnicze komutatora. Szczotki	504
11.5.1. Wymiary komutatora	504
11.5.2. Szczotki	504
11.5.3. Wycinek komutatora	506
11.6. Obwód magnetyczny biegunów głównych	508
11.6.1. Szczelina powietrzna	508
11.6.2. Nasycenie w obwodzie magnetycznym biegunów głównych	509
11.6.3. Wymiary biegunów	509
11.6.4. Określenie przepływu biegunów głównych	510
11.6.4.1. Maszyna bocznikowa	511
11.6.4.2. Maszyna szeregowo-bocznikowa	511
11.7. Obwód magnetyczny biegunów pomocniczych (komutacyjnych)	512
11.8. Uzwojenie kompensacyjne	515
11.9. Zagadnienia gospodarcze przy obliczaniu maszyn elektrycznych	517
11.9.1. Uwagi ogólne	517
11.9.2. Sposób oceny ekonomiczności konstrukcji maszyn prądu stałego	518
11.9.3. Ocena ekonomiczności eksploatacji maszyn prądu stałego	522
12. Przykłady obliczeń maszyn prądu stałego	523
12.1. Obliczenie silnika bocznikowego prądu stałego 2,5 kW, 110 V, 940 obr/min	523
12.1.1. Obliczenia elektromagnetyczne	523
12.1.2. Obliczenie wentylacyjne	551
12.1.3. Obliczenie ciepłne	559
12.1.4. Ocena obliczenia	567
12.1.4.1. Ocena wyników eksploatacyjnych wykonanego obliczenia silnika 2,5 kW, 110 V, 940 obr/min	567

12.1.4.2. Ocena ekonomiczna projektu silnika bocznikowego prądu stałego 2,5 kW, 110 V, 940 obr/min budowy okapturzonej	569
12.1.5. Wskazówki do następnego obliczenia	573
12.2. Przykład obliczenia uzwojenia kompensacyjnego i komutacyjnego	575
13. Budowa seryjna maszyn prądu stałego	579
13.1. Uwagi ogólne	579
13.2. Typ maszyny	583
13.2.1. Silnik a prądnicą	583
13.2.2. Zmiana napięcia	586
13.2.3. Zmiana liczby obrotów	588
13.2.4. Maszyny otwarte a zamknięte, maszyny dla pracy ciągłej, dorywczej i przerywanej	589
13.3. Seria maszyn	590
13.4. Typ przedłużony	591
13.5. Sposób oceny ekonomiczności konstrukcji serii maszyn prądu stałego	592
14. Zarys konstrukcji maszyn prądu stałego	595
14.1. Blachy twornika	595
14.2. Sposób umocowania blach	597
14.3. Żłobki i klin	599
14.4. Rozpórki-odstępniaki w kanałach wentylacyjnych	600
14.5. Wał	601
14.5.1. Sprawdzenie wału na strzałkę ugięcia	603
14.5.2. Sprawdzenie wytrzymałościowe wału	606
14.5.3. Wyważanie twornika	606
14.5.4. Krytyczna prędkość obrotowa	607
14.6. Łożyska	608
14.6.1. Łożyska toczne kulkowe lub rolkowe	608
14.6.2. Łożyska ślizgowe	609
14.7. Uzwojenie twornika	611
14.8. Bandaże	613
14.9. Budowa komutatora	614
14.10. Bieguny główne	617
14.11. Bieguny komutacyjne	619
14.12. Jarzmo	620
14.13. Trzymadła szczotkowe	623
14.14. Przykłady konstrukcji	627
Bibliografia	631
Skorowidz alfabetyczny	633