

Spis treści

Wykaz oznaczeń	9
Przedmowa	13
1. Metody badań i materiały konstrukcyjne	21
1.1. Metody badań	21
1.2. Materiały konstrukcyjne	25
1.2.1. Struktura i właściwości fizyczne metali	25
1.2.2. Nadprzewodnictwo	44
1.2.3. Właściwości magnetyczne ciał (ferromagnetyzm)	51
1.2.4. Półprzewodniki i dielektryki	91
2. Podstawowe równania pola elektromagnetycznego	96
2.1. Wyjściowe prawa i równania elektrodynamiki	96
2.2. Formułowanie i metody rozwiązywania równań różniczkowych pola	103
2.3. Środowiska anizotropowe	118
2.4. Środowiska nieliniowe	122
2.5. Podstawowe równania magnetohydrodynamiki i magnetogazodynamiki	125
2.6. Elektrodynamika nadprzewodników	130
2.7. Elektrodynamika środowisk nieliniowych	133
2.8. Elektrodynamika urządzeń półprzewodnikowych	133
2.9. Elektrodynamika układów elektrochemicznych	134
2.10. Ogólne równanie falowe	135
2.11. Metoda Fouriera	137
2.12. Równanie falowe we współrzędnych cylindrycznych	139
2.13. Fala elektromagnetyczna płaska	141
2.14. Odbicie i załamanie fali płaskiej	155
3. Przenoszenie i przetwarzanie mocy pola	162
3.1. Twierdzenie Poyntinga. Wektor Poyntinga	162
3.2. Wnikanie energii elektromagnetycznej do masywnej półprzestrzeni przewo- dzącej	165
3.3. Strumień mocy pola przy przejściu przewodów przez ścianę stalową	168
3.4. Strumień mocy pola w kablu współosiowym i szynie ekranowanej	171

3.5.	Strumień mocy pola w kondensatorze, cewce i transformatorze	173
3.6.	Strumienie mocy pola i ich przetwarzanie w maszynach wirujących	175
3.6.1.	Strumień mocy pola elektromagnetycznego w szczelinie maszyny indukcyjnej	175
3.6.2.	Strumienie mocy pola w maszynie synchronicznej	177
4.	Ekranowanie części konstrukcyjnych	181
4.1.	Rodzaje i zadania ekranów	181
4.2.	Ekran i boczniki magnetyczne	184
4.2.1.	Ekran kulisty i poprzeczny cylindryczny	184
4.2.2.	Podłużne ekrany magnetyczne	187
4.3.	Ekran elektromagnetyczny. Falowa metoda obliczeń	194
4.3.1.	Przydatność praktyczna falowej metody obliczeń pola	194
4.3.2.	Ekran przenikalny przy jednostronnym padaniu fali	194
4.3.3.	Ekran przenikalny przy dwustronnym padaniu fali	201
4.4.	Straty mocy w ekranach	204
4.4.1.	Wektor Poyntinga i straty mocy w ekranie jednostronnym	204
4.4.2.	Wektor Poyntinga i straty mocy przy obustronnym symetrycznym padaniu fali	208
4.5.	Ekranowanie kadzi transformatorów	213
4.5.1.	Ekranowanie magnetyczne (bocznikowanie) kadzi	214
4.5.2.	Ekranowanie elektromagnetyczne kadzi	218
4.5.3.	Trójwymiarowa analiza komputerowa i projektowanie interaktywne ekranów	222
4.6.	Silniki indukcyjne z ekranowanym i wielowarstwowym wirnikiem	227
4.6.1.	Charakterystyka ogólna	227
4.6.2.	Równania podstawowe silników indukcyjnych wielowarstwowych	228
4.7.	Ekranowanie w dużych generatorach	233
4.7.1.	Ekranowanie (bocznikowanie) magnetyczne i kształtowanie pola	233
4.7.2.	Ekranowanie elektromagnetyczne w generatorach	235
4.8.	Ekranowanie przy nagrzewaniu indukcyjnym	236
4.9.	Ekranowanie szyn i przewodów	237
4.9.1.	Ekran cylindryczny przewodu pojedynczego	237
4.9.2.	Ekran cylindryczny w poprzecznym polu równomiernym	246
4.9.3.	Ekran szyn układów blokowych w elektrowniach	248
4.10.	Pole elektromagnetyczne w ekranach wielowarstwowych	254
4.10.1.	Przewodnik dwuwarstwowy	254
4.10.2.	Wpływ izolacji pod ekranem	256
5.	Pole magnetyczne przy powierzchniach żelaznych	258
5.1.	Metoda odbić zwierciadlanych	258
5.1.1.	Pojedyncze odbicie prądu stałego	258
5.1.2.	Zastosowanie teorii pola stałego do pól przemiennych	261
5.1.3.	Odbicie magnetyczne prądu w cylindrze żelaznym	265
5.1.4.	Wielokrotne odbicia zwierciadlane	267
5.1.5.	Odbicia magnesów i obwodów z prądem stałym	270
5.2.	Pole połączeń czołowych maszyn elektrycznych	273
5.3.	Pole przepustów	276

5.4.	Pole szyn w pobliżu powierzchni stalowej	278
5.5.	Pole rozproszenia w transformatorach i żłobkach maszyn elektrycznych	281
5.5.1.	Zastosowanie metody wielokrotnych odbić zwierciadlanych	281
5.5.2.	Metody rozwiązywania pola w oknie transformatora za pomocą szere- gów Fouriera	282
5.5.3.	Metody numeryczne; rozwiązywanie pola magnetycznego rozproszenia	285
5.5.4.	Żłobek maszyny indukcyjnej głębokożłobkowej	287
5.5.5.	Pole w szczelinie maszyny elektrycznej	292
5.6.	Pole pary przewodów w pobliżu ściany stalowej	296
6.	Zjawiska elektromagnetyczne w metalach o stałej przenikalności	301
6.1.	Zastosowanie metody wielokrotnych odbić fali	301
6.2.	Blacha elektrotechniczna	301
6.3.	Straty mocy przy przejściu przewodu przez ścianę stalową	309
6.4.	Straty mocy w pokrywach stalowych ze wstawkami niemagnetycznymi	313
6.5.	Indukowane przebiegi nieustalone	316
6.6.	Wirnik masywny silnika indukcyjnego	319
6.7.	Wirnik kubkowy	325
6.8.	Zasady nagrzewania indukcyjnego	327
6.9.	Tory wieloprądowe	330
7.	Zjawiska elektrodynamiczne w ciałach ferromagnetycznych	340
7.1.	Aproksymacja charakterystyk magnesowania	340
7.2.	Metody uwzględniania zmiennej przenikalności magnetycznej $\mu = (H)$	346
7.2.1.	Metoda Rosenberga (1923) dla przewodów żelaznych	347
7.2.2.	Metoda fal prostokątnych	348
7.2.3.	Metoda Nejmana (1950)	349
7.2.4.	Przenikalność zastępcza	353
7.2.5.	Metody komputerowe	354
7.3.	Zależność strat rozproszonych w masywnych częściach stalowych trans- formatora od prądu i temperatury	357
7.4.	Straty mocy w stalowych pokrywach transformatorów	360
7.5.	Obliczanie strat rozproszonych w masywnych ścianach stalowych metodą szeregów Fouriera	363
7.5.1.	Metoda ogólna	363
7.5.2.	Wzory analityczne w przypadku sinusoidalnego rozkładu pola na po- wierzchni stali	367
7.5.3.	Komputerowe obliczanie strat mocy w płycie stalowej umieszczonej w polu szyn równoległych	370
7.6.	Straty mocy w kadzi transformatora	375
7.6.1.	Dwuwymiarowe rozwiązanie numeryczne	375
7.6.2.	Trójwymiarowe obliczanie analityczno-numeryczne pola rozproszenia i strat mocy w kadzi o stałej przenikalności	376
7.6.3.	Komputerowe, trójwymiarowe, analityczno-numeryczne (MAN-3D) obliczanie rozproszonych strat mocy w kadzi transformatora	382
7.6.4.	Trójwymiarowe obliczanie numeryczne pól rozproszenia w transfor- matorach trójfazowych	388
7.6.5.	Wdrożenie i weryfikacja programów klasy MSR-3D w przemyśle	394

8. Siły w układach elektrodynamicznych	402
8.1. Zasady obliczania sił działających na szyny i uzwojenia transformatorów ..	402
8.2. Siły działające na szyny umieszczone w pobliżu stalowych elementów konstrukcji	410
8.3. Siły działające na powierzchnię przewodników	410
8.4. Siły w części żłobkowej uzwojeń maszyn elektrycznych	411
8.5. Siły i momenty reluktancyjne	417
9. Lokalne nagrzewanie się części konstrukcyjnych	420
9.1. Elektromagnetyczne kryteria lokalnych przegrzań	420
9.2. Metody zapobiegania miejscowym przegrzaniom konstrukcji	429
9.3. Nagrzewanie się pokryw transformatorów	433
9.4. Dopuszczalny prąd w przepustach	433
9.5. Straty mocy od prądów wirowych i lokalne przegrzania w kominkach transformatorów	435
9.6. Obliczenia komputerowe kominków i boczników	435
9.6.1. Kominki jednofazowe	436
9.6.2. Model symulacyjny MSR-3D kominków trójfazowych	439
9.6.3. Obliczanie reluktancji dla sieci MSR-3D	440
10. Metody badań eksperymentalnych	443
10.1. Weryfikacja eksperymentalna obliczeń teoretycznych	443
10.2. Zasady teorii elektrodynamicznego podobieństwa	447
10.3. Zasada modelowania indukcyjnych urządzeń grzejnych	452
10.4. Modelowanie torów wieloprądowych	454
10.5. Modelowanie transformatorów i ich części	455
10.6. Metoda termometryczna pomiaru strat jednostkowych	458
10.7. Badania dopuszczalnych przewzbudzeń transformatorów	468
10.8. Pomiar mocy przy niskich współczynnikach mocy	470
10.9. Inne metody pomiaru	476
10.10. Diagnostyka elementów metalowych	482
10.11. Krytyczna odległość kadzi od uzwojeń w transformatorze	483
10.12. Wpływ kolektorów strumienia rozproszenia	490
Wnioski	493
Dodatki	495
Literatura	502
Skorowidz	518