
Spis treści

Przedmowa	1
Oznaczenia	7
1. Wymagania normalizacyjne w zakresie łączników elektroenergetycznych	11
2. Równania Maxwella elektrodynamiki klasycznej	15
2.1. Uwagi wstępne	17
2.2. Teoria pola elektromagnetycznego	17
2.3. Ujęcie obwodowe i polowe opisu procesów łączeniowych	19
2.4. Równania Maxwella w próżni	19
2.5. Twierdzenie Gaussa-Ostrogradskiego i twierdzenie Stokesa	26
2.6. Równania Maxwella w materii	33
2.7. Postać całkowa równań Maxwella w próżni i w materii	38
2.8. Warunki brzegowe w ośrodkach materialnych	40
2.9. Równanie ciągłości i natężenie prądu elektrycznego	43
2.10. Równania elementów R , C , L , M i równania Kirchhoffa	45
2.10.1. Prawo Ohma $u = Ri$ oraz zależności $q = Cu$, $\psi = Li$, $\psi = Mi$	45
2.10.2. Równania Kirchhoffa napięciowe i prądowe	55
3. Rachunek różniczkowy i całkowy w zastosowaniach inżynierskich	59
3.1. Uwagi wstępne	61
3.2. Tożsamości trygonometryczne	61
3.3. Granica $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$	65
3.4. Pochodna jako granica ilorazu różnicowego	70
3.5. Obliczenie pochodnych funkcji $\cos x$, $\sin x$, x^n , a^x , e^x	72
3.6. Podstawowe operacje na pochodnych i wzór Leibniza	81
3.7. Całkowanie przez części jako konsekwencja wzoru Leibniza	82
3.8. Rozwinięcie funkcji okresowych w szereg Fouriera, wzory Eulera-Fouriera	84
3.9. Rozwinięcie funkcji analitycznych w szereg Taylora i Maclaurina	89
3.9.1. Szereg Taylora i Maclaurina z resztą postaci Lagrange'a	89
3.9.2. Zbieżność sumy nieskończonej szeregu Taylora	99
3.9.3. Zbieżność sumy nieskończonej szeregu Taylora dla funkcji e^x , $\cos x$, $\sin x$	99

3.9.4.	Rozwinięcie funkcji e^x , $\cos x$, $\sin x$ w szereg Maclaurina . . .	101
3.9.5.	Pomijanie małych wyższego rzędu w rozwinięciach Taylora funkcji harmoniczych	102
3.10.	Wzór Eulera $e^{ix} = \cos x + i \sin x$	104
3.11.	Reguła de l'Hospitala	108
4.	Algebra amplitud zespolonych	
	jako konsekwencja wzoru Eulera	111
4.1.	Odpowiedź układów liniowych na wymuszenia harmoniczne	113
4.2.	Równania Kirchhoffa w zapisie zespolonym	115
4.3.	Kompensacja prądów ziemnozwarciowych	121
4.3.1.	Działania trygonometryczne na funkcjach harmoniczych . . .	121
4.3.2.	Działania algebraiczne na amplitudach zespolonych	126
4.4.	Uwagi końcowe	128
5.	Równania różniczkowe zwyczajne	131
5.1.	Uwaga wstępna	133
5.2.	Równania różniczkowe n -tego rzędu	133
5.2.1.	Postać ogólna i kanoniczna, warunki brzegowe i początkowe, rozwiązanie szczególne i ogólne dla warunków początkowych .	133
5.2.2.	Twierdzenie Cauchy'ego o istnieniu i jednoznaczności rozwiązania szczególnego	136
5.3.	Równania różniczkowe n -tego rzędu <i>liniowe o zmiennych</i> <i>współczynnikach</i>	136
5.3.1.	Równania <i>niejednorodne i jednorodne</i>	136
5.3.2.	Liniowa zależność i niezależność układu funkcji, wyznacznik Wronskiego do badania liniowej zależności i niezależności . .	138
5.3.3.	Rozwiązanie <i>ogólne</i> równania <i>jednorodnego</i> , RORJ, jako liniowa kombinacja jego n rozwiązań <i>szczególnych</i>	139
5.3.4.	Rozwiązanie <i>ogólne</i> równania <i>niejednorodnego</i> , RORN, jako suma RORJ i rozwiązania <i>szczególnego</i> równania niejednorodnego, RSRN: $RORN = RORJ + RSRN$	143
5.4.	Równania różniczkowe n -tego rzędu <i>liniowe o stałych</i> współczynnikach	147
5.4.1.	Znajdowanie rozwiązania <i>ogólnego</i> równania jednorodnego, RORJ, równanie charakterystyczne, jego wartości własne i różne ich przypadki	147
5.4.2.	Znajdowanie rozwiązania <i>szczególnego</i> równania niejednorodnego, RSRN	151
5.4.3.	Znajdowanie rozwiązania <i>ogólnego</i> równania niejednorodnego, RORN	151
5.5.	Rozwiązywanie równań różniczkowych <i>liniowych i o stałych</i> <i>współczynnikach</i>	152

6. Przekształcenie całkowe Laplace’a	155
6.1. Transformata (całka) Fouriera jako przesłanka dla transformaty Laplace’a	157
6.2. Podstawowe definicje i twierdzenia przekształcenia całkowego Laplace’a	161
6.2.1. Przekształcenie wprost	161
6.2.2. Przekształcenie odwrotne: całka Bromwicha	164
6.2.3. Addytywność i jednorodność (liniowość)	164
6.2.4. Transformata pochodnej	165
6.2.5. Transformata całki	167
6.2.6. Efekt „przesunięcia” dla transformaty Laplace’a funkcji $e^{\alpha t} f(t)$	168
6.3. Transformaty całkowe Laplace’a funkcji harmoniczych i hiperbolicznych	168
6.3.1. Transformaty funkcji $\cos \omega t$, $\sin \omega t$ metodą całkowania przez części	168
6.3.2. Transformaty funkcji harmoniczych tłumionych $e^{\alpha t} \cos \omega t$, $e^{\alpha t} \sin \omega t$	170
6.3.3. Transformaty funkcji $\cos \omega t$, $\sin \omega t$, $\cosh \omega t$, $\sinh \omega t$ ze wzoru Eulera	170
6.3.4. Transformaty funkcji $\sin(\omega t + \psi)$, $\sin^2 \omega t$ z tożsamości trygonometrycznych	171
6.4. Transformaty funkcji wykładniczej e^{at} i potęgowej t^n	172
6.4.1. Transformata funkcji wykładniczej e^{at}	172
6.4.2. Transformata funkcji potęgowej t^n	173
6.5. Transformata funkcji okresowej i fali trójkątnej	176
6.5.1. Transformata dowolnych funkcji okresowych (w tym nieharmonicznych)	176
6.5.2. Transformata fali trójkątnej	178
6.6. Transformata odwrotna Laplace’a dla ułamków prostych	180
6.6.1. Rozkład funkcji wymiernej na ułamki proste	180
6.6.2. Ważna dygresja na temat oscylatora harmonicznego tłumionego	184
6.7. Twierdzenia o transformacie odwrotnej dla dowolnych funkcji wymiernych	187
6.7.1. Twierdzenie o residuach	187
6.7.2. Twierdzenie Heaviside’a	188
6.8. Zestawienie wprowadzonych transformat Laplace’a	190
6.9. Rozwiązywanie równań różniczkowych przy użyciu transformaty Laplace’a	191
6.10. Transformata Laplace’a dla równań elementów w równaniach Kirchhoffa	192
7. Opis stanu układu przy użyciu równań różniczkowych Kirchhoffa	195
7.1. Prądy zwarciove w obwodach prądu przemiennego przy zwarciach odległych od generatorów (patrz też punkt 8.1 i punkt 9.3)	197

7.1.1.	Składowe wymuszone (ustalone) i swobodne (przejściowe) . .	197
7.1.2.	Prąd zwarciovowy o wartości największej możliwej w danym obwodzie	203
7.2.	Udar prądu magnesowania przy załączaniu transformatorów nieobciążonych (patrz też punkt 11.1)	206
7.3.	Załączanie prądu stałego	208
7.3.1.	Rozwiązanie dla zerowego warunku początkowego przy załączaniu prądu obciążeniowego lub prądu zwarciovowego (patrz też punkt 9.2)	208
7.3.2.	Rozwiązanie dla niezerowego warunku początkowego przy załączaniu prądu obciążeniowego łącznikiem bezłukowym . .	209
7.4.	Wyłączanie prądu stałego łącznikiem bezłukowym	211
7.4.1.	Napięcie na łączniku po wyłączeniu (zerwaniu) prądu (patrz też punkt 8.2)	211
7.4.2.	Maksimum napięcia na łączniku po wyłączeniu prądu (przepięcie)	215
8.	Zastosowanie przekształcenia Laplace’a do rozwiązywania równań różniczkowych Kirchhoffa	219
8.1.	Prądy zwarciovowe w obwodach prądu przemiennego przy zwarciach odległych od generatorów (patrz też punkt 7.1 i punkt 9.3)	221
8.2.	Wyłączanie prądu stałego łącznikiem bezłukowym: napięcie na łączniku po wyłączeniu (zerwaniu) prądu (patrz też punkt 7.4.1) . .	226
8.3.	Przewodność łuku łączeniowego opisana równaniem Mayra	228
8.3.1.	Przesłanki dla sformułowania równania Mayra	228
8.3.2.	Rozwiązanie równania Mayra dla wymuszenia prądowego w postaci prądu wyłączanego $i_a(t) = I_m \sin \omega t$: napięcie łuku	229
8.3.3.	Rozwiązanie równania Mayra dla wymuszenia napięciowego w postaci napięcia powrotnego $u_a(t) = E_m(1 - \cos \omega_0 t)$: prąd połukowy	234
9.	Zastosowanie twierdzenia Thévenina do obliczeń prądu załączanego	243
9.1.	Twierdzenie Thévenina w postaci operatorowej	245
9.2.	Załączanie prądu stałego dla zerowego warunku początkowego prądowego (patrz też punkt 7.3.1)	246
9.3.	Prądy zwarciovowe w obwodach prądu przemiennego przy zwarciach odległych od generatorów (patrz też punkt 7.1 i punkt 8.1)	248
9.4.	Przetężenia i przepięcia przy załączaniu pojedynczej baterii kondensatorów (załączanie pojemności na pojemność)	249
10.	Zastosowanie twierdzenia Nortona do obliczeń napięcia powrotnego	255
10.1.	Twierdzenie Nortona w postaci operatorowej	257
10.2.	Napięcie powrotne przy wyłączaniu zwarć na zaciskach wyłącznika . .	258

10.2.1. Rozwiązanie dla obwodu bez tłumienia	258
10.2.2. Rozwiązanie dla obwodu z tłumieniem	261
10.3. Składowa wymuszona napięcia powrotnego w obwodach trójfazowych i współczynnik biegunowy	266
10.3.1. Napięcie powrotne dla pierwszego bieguna wyłączającego przy wyłączaniu zwarcia 3f (bez doziemienia)	267
10.3.2. Napięcie powrotne dla pierwszego bieguna wyłączającego przy wyłączaniu zwarcia 3fz (z doziemieniem)	273
10.3.3. Napięcie powrotne dla drugiego i trzeciego bieguna wyłączającego przy wyłączaniu zwarcia 3f (bez doziemienia) i 3fz (z doziemieniem)	278
10.4. Napięcie powrotne o podwyższonej stromości	282
10.4.1. Napięcie powrotne przy wyłączaniu zwarć za dławikiem . . .	282
10.4.2. Napięcie powrotne przy wyłączaniu zwarć pobliskich	285
10.4.3. Napięcie powrotne przy wyłączaniu w warunkach opozycji faz	299
11. Przybliżone rozwiązania analityczne wybranych procesów łączeniowych	301
11.1. Udar prądu magnesowania przy załączaniu transformatorów nieobciążonych (patrz też punkt 7.2)	303
11.2. Prądy zwarcia w obwodach prądu przemiennego przy zwarciach w pobliżu generatorów (zwarcia generatorowe)	307
11.2.1. Równania Kirchhoffa opisujące stan przejściowy i ustalony generatora synchronicznego dla obliczeń numerycznych	308
11.2.2. Upraszczanie równania Kirchhoffa poprzez zastosowanie transformaty Parka i założeń dotyczących indukcyjności uzwojeń stojana i wirnika	315
11.3. Prądy zwarć generatorowych na podstawie jakościowej analizy składowych prądu zwarcia dla schematów zastępczych (opóźnione przejście prądu zwarcia przez wartość zerową)	331
Bibliografia	339
Skorowidz nazwisk	345