

Piotr Kowalczyk, Rafał Lech, Jerzy Mazur

Technika

WYSOKICH

CZĘSTOTLIWOŚCI

w zadaniach

Gdańsk 2022

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Dariusz Mikielewicz

RECENZENT
Bartłomiej Salski

REDAKCJA JĘZYKOWA
Agnieszka Frankiewicz

SKŁAD
Piotr Kowalczyk, Rafał Lech

PROJEKT OKŁADKI
Ireneusz Jelonek

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

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

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2022

ISBN 978-83-7348-859-5

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 10,6, ark. druku 14,0, 1266/1159

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

Spis treści

Podziękowania	5
Wstęp	7
Wykaz ważniejszych oznaczeń	9
1 Model linii długiej	11
1.1. Podstawowe parametry linii długiej	13
1.2. Współczynniki odbicia i fali stojącej	20
1.3. Transformacja impedancji	32
1.4. Transformacja współczynnika odbicia	42
1.5. Transformacja admitancji	44
1.6. Straty w linii długiej	45
1.7. Zadania dodatkowe	52
2 Prowadnice falowe	58
2.1. Model polowy	59
2.2. Zastosowanie modeli polowego i obwodowego	62
2.2.1. Prowadnica TEM na przykładzie linii współosiowej	64
2.2.2. Prowadnica TE/TM – falowód prostokątny	64
2.3. Zadania dodatkowe	78
3 Wykres Smitha	81
3.1. Impedancyjny wykres Smitha	81
3.2. Admitancyjny wykres Smitha	92
3.3. Zastosowanie wykresu Smitha	96
3.4. Zadania dodatkowe	102
4 Układy dopasowujące	106
4.1. Transformator ćwierćfalowy	106
4.2. Dopasowanie przy pomocy elementów o stałych skupionych	109
4.2.1. Rozwiązanie analityczne	110
4.2.2. Rozwiązanie przy wykorzystaniu wykresu Smitha	111
4.3. Dopasowanie realizowane przy pomocy strojnika pojedynczego	117
4.3.1. Rozwiązanie analityczne	119
4.3.2. Rozwiązanie przy wykorzystaniu wykresu Smitha	121
4.4. Zadania dodatkowe	129

5	Układy rezonansowe	130
5.1.	Układy RLC	130
5.1.1.	Szeregowy układ RLC	131
5.1.2.	Równoległy układ RLC	133
5.2.	Rezonatory zbudowane z linii transmisyjnych	134
5.2.1.	Zwarta linia półfalowa	135
5.2.2.	Rozwarta linia półfalowa	136
5.2.3.	Rezonator współosiowy	136
5.2.4.	Rezonator mikropaskowy	140
5.2.5.	Wnęki rezonansowe	145
5.3.	Zasilanie rezonatorów	152
5.3.1.	Dobroć sprzężonego modelu rezonatora równoległego	153
5.4.	Zadania dodatkowe	159
6	Opis macierzowy układów wielowrotowych	161
6.1.	Macierz rozproszenia	164
6.1.1.	Macierze rozproszenia wybranych układów	167
6.1.2.	Redukcja wrót układów wielowrotowych	169
6.1.3.	Wrota o zespolonej impedancji charakterystycznej	170
6.2.	Metody wyznaczania macierzy rozproszenia	172
6.2.1.	Wyznaczanie macierzy rozproszenia z definicji	172
6.2.2.	Macierze rozproszenia układów symetrycznych	186
6.3.	Analiza struktur rezonansowych	204
6.4.	Własności układów pasywnych	207
6.5.	Związki z innymi macierzami obwodowymi	212
6.6.	Wielorodzajowa macierz rozproszenia	216
6.6.1.	Zastosowanie	219
6.7.	Zadania dodatkowe	222
	Literatura	224

Podziękowania

Serdecznie dziękujemy Pani Małgorzacie Wareckiej za wnikliwą analizę manuskryptu. Dziękujemy również Panu Michałowi Baranowskiemu, Panu Sebastianowi Dziejewiczowi i Panu Maciejowi Jasińskiemu za pomocne uwagi i komentarze.

Pragniemy także podziękować recenzentowi niniejszego opracowania Panu Profesorowi Bartłomiejowi Salskiemu za liczne sugestie i uwagi dotyczące poruszanych w pracy zagadnień.

Wstęp

Żyjemy w czasach, w których biura podróży oferują wycieczki w kosmos, ekspres wie, kiedy się obudzisz i czy masz ochotę na kawę, a lodówka chce zrobić za Ciebie zakupy. Coraz więcej urządzeń elektronicznych nas otacza, coraz więcej od nich wymagamy i coraz bardziej jesteśmy od nich zależni (albo uzależnieni). Liczba tych urządzeń oraz wykonywanych przez nie zadań nieustannie wzrasta. Wymaga to wprowadzania nowych i coraz bardziej wyrafinowanych technologii, które oferują większe przepływności i prędkości transmisji danych. Można to osiągnąć, zwiększając częstotliwości i pasma pracy sygnałów przesyłanych przez nowoczesne urządzenia elektroniczne.

W odróżnieniu od elektroniki niskiej częstotliwości, przy częstotliwościach wysokich pojawia się wiele zjawisk i efektów, których nie można zignorować, chcąc zrozumieć i prawidłowo opisać działanie nowoczesnych urządzeń. Tematyka poruszana w niniejszej książce dotyczy zagadnień związanych z modelowaniem tych zjawisk w układach elektronicznych pracujących w zakresie bardzo wysokich częstotliwości i stanowi wstęp do ich projektowania.

Opracowanie jest owocem wieloletnich doświadczeń grupy nauczycieli akademickich Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, kształcących studentów w zakresie techniki mikrofalowej i antenowej oraz telekomunikacji światłowodowej i bezprzewodowej. Praca ta stanowi rozszerzenie i kontynuację podręczników *Podstawy elektromagnetyzmu w zadaniach* oraz *Pola i fale elektromagnetyczne w zadaniach*. Zachowana jest również konwencja prezentacji treści przy wykorzystaniu w pełni rozwiązanych i skomentowanych problemów z zakresu techniki wysokich częstotliwości.

Książka składa się z sześciu rozdziałów, opatrzonych wprowadzeniami teoretycznymi. Ponadto, każdy rozdział zawiera zestaw zadań przeznaczonych do samodzielnego rozwiązania, dla których podane są również niezbędne wskazówki i odpowiedzi. Jednakże studiującym gorąco polecamy, aby przed przystąpieniem do rozwiązywania poruszanych tu problemów sięgnęli do odpowiednich podręczników akademickich i notatek z wykładów.

W książce przyjęto angielską konwencję zapisu liczb, czyli separatorem dziesiętnym jest kropka zamiast przecinka stosowanego standardowo w notacji polskiej.

Niech wektor Poyntinga będzie z Wami!

Wykaz ważniejszych oznaczeń

\hat{A}	–	wskaz wielkości $A(t)$ o harmoniczej zmienności w czasie
$\langle A(t) \rangle_t$	–	średnia wartość wielkości $A(t)$ (po pełnym okresie)
\mathbf{A}^H	–	sprzężenie hermitowskie macierzy \mathbf{A}
a^*	–	sprzężenie zespolone liczby $a \in \mathbb{C}$
a_i	–	sygnał wychodzący z wrót i -tych
\vec{B}	–	wektor indukcji pola magnetycznego
B	–	susceptancja
b	–	unormowana wartość B
b_i	–	sygnał wchodzący do wrót i -tych
C	–	pojemność
\tilde{C}	–	pojemność na jednostkę długości (pojemność liniowa)
\vec{D}	–	wektor indukcji pola elektrycznego
\vec{E}	–	wektor natężenia pola elektrycznego
\mathbf{E}	–	macierz jednostkowa
f	–	częstotliwość
G	–	konduktancja
g	–	unormowana wartość G
\vec{H}	–	wektor natężenia pola magnetycznego
I	–	natężenie, fala prądowa
$\vec{i}_x, \vec{i}_y, \vec{i}_z$	–	wersory układu współrzędnych prostokątnych
\vec{J}_S	–	liniowa gęstość elektrycznego prądu powierzchniowego
j	–	jednostka urojona
L	–	indukcyjność
\tilde{L}	–	indukcyjność na jednostkę długości (indukcyjność liniowa)
P	–	moc sygnału
p	–	poprzeczna liczba falowa
PEC	–	idealny przewodnik elektryczny (ang. <i>Perfect Electric Conductor</i>)
PMC	–	idealny przewodnik magnetyczny (ang. <i>Perfect Magnetic Conductor</i>)
R	–	rezystancja
r	–	unormowana wartość R
\mathbf{S}	–	macierz rozproszenia
\mathbf{T}	–	macierz transmitancji
U	–	napięcie, fala napięciowa
WFS	–	współczynnik fali stojącej

X	–	reaktancja
x	–	unormowana wartość X
Y	–	admitancja (obciążenia, falowa lub charakterystyczna)
y	–	unormowana wartość Y
\mathbf{Y}	–	macierz admitancji
\mathbf{Z}	–	macierz impedancji
Z	–	impedancja (obciążenia, falowa lub charakterystyczna)
z	–	unormowana wartość Z
α	–	współczynnik tłumienia
β	–	współczynnik fazowy
γ	–	współczynnik propagacji
Γ	–	współczynnik odbicia
ε_0	–	przenikalność elektryczna próżni
ε_r	–	względna przenikalność elektryczna ośrodka
μ_0	–	przenikalność magnetyczna próżni
μ_r	–	względna przenikalność magnetyczna ośrodka
ρ_S	–	powierzchniowa gęstość ładunku
σ	–	przewodność (konduktywność) właściwa ośrodka
ω	–	pulsacja