



Włodzimierz Zieniutycz

Podstawy pól i fal elektromagnetycznych



Gdańsk 2021

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

RECENZENT

Andrzej Kucharski

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

SKŁAD

Włodzimierz Zieniutycz

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 jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2021

ISBN 978-83-7348-852-6

Spis treści

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	7
Przedmowa	11
1. Narzędzia matematyczne analizy zjawisk polowych i ich interpretacja fizyczna	15
1.1. Całki skierowane	15
1.2. Operatory różniczkowe	18
1.3. Zapis wektorowy operatorów różniczkowych – potencjały	22
1.4. Konwencja punktów źródeł pola i punktów obserwacji	24
2. Pola elektryczne i magnetyczne w próżni – własności podstawowe	26
2.1. Pole elektryczne	26
2.2. Pole magnetyczne	30
2.3. Koncepcja materii ciągłej	32
2.4. Prawo sił Lorentza	35
2.5. Równanie ciągłości	37
3. Podstawowe prawa pola elektromagnetycznego	39
3.1. Prawo Gaussa	40
3.2. Prawo źródeł magnetycznych	45
3.3. Prawo indukcji Faradaya	46
3.4. Uogólnione prawo Ampère’a	50
3.5. Równania Maxwella w postaci różniczkowej, całkowej oraz dla amplitud zespolonych	54
4. Równania Maxwella w ośrodkach materialnych	58
4.1. Uproszczony model idealnego i rzeczywistego przewodnika – prawo Ohma	58
4.2. Polaryzacja ładunków związanych – przenikalność elektryczna ośrodka	60
4.3. Dielektryk stratny – zespolona przenikalność elektryczna	62

4.4.	Efekty magnetyczne w ośrodku materialnym – przenikalność magnetyczna ośrodka	64
4.5.	Klasyfikacja własności ośrodków materialnych	66
4.6.	Równania Maxwella dla ośrodków materialnych	69
5.	Warunki dla pól elektrycznego i magnetycznego na granicy ośrodków	71
5.1.	Składowe normalne wektorów pól: elektrycznego i magnetycznego	72
5.2.	Składowe styczne wektorów pól: elektrycznego i magnetycznego	76
5.3.	Podsumowanie – warunki przy powierzchni idealnego przewodnika	78
6.	Zasada zachowania energii	82
6.1.	Zasada zachowania energii w ujęciu polowym	82
6.2.	Twierdzenie Poyntinga	83
6.3.	Twierdzenie i wektor Poyntinga dla amplitud zespolonych	88
7.	Rozwiązanie równań Maxwella – przypadek statyczny	92
7.1.	Elektrostatyka	93
7.2.	Magnetostatyka	100
7.3.	Częstotliwość graniczna stosowania przybliżenia elektrostatycznego	104
8.	Rozwiązanie równań Maxwella – przypadek dynamiczny	106
8.1.	Jednorodne równanie falowe – metoda rozdzielania zmiennych	107
8.2.	Fala płaska w przybliżeniu jednowymiarowym – parametry i własności	109
8.3.	Uogólniony zapis fali płaskiej	113
8.4.	Polaryzacja fali płaskiej	118
8.5.	Polaryzacja kołowa a polaryzacja liniowa	122
8.6.	Prędkość grupowa – zjawisko dyspersji	125
9.	Fala płaska w stratnym ośrodku izotropowym	129
9.1.	Współczynnik propagacji	129
9.2.	Propagacja fali płaskiej w niskostratnym dielektryku	132
9.3.	Fala płaska w dobrym przewodniku – głębokość wnikania	134
10.	Fala płaska na granicy ośrodków	141
10.1.	Padanie prostopadle fali na granicę dwóch ośrodków	141
10.1.1.	Efekt i współczynnik fali stojącej	145
10.1.2.	Transformator ćwierćfalowy	148
10.1.3.	Padanie fali pod kątem prostym na powierzchnię idealnego przewodnika	151
10.2.	Padanie ukośne fali na granicę dwóch ośrodków	154
10.2.1.	Przypadek polaryzacji równoległej	155
10.2.2.	Przypadek polaryzacji prostopadłej	158
10.2.3.	Kąt Brewstera	160
10.2.4.	Kąt całkowitego wewnętrznego odbicia	161

11. Równania Maxwella w obecności źródeł	165
11.1. Niejednorodne równanie falowe dla wektorów pól elektromagnetycznych	165
11.2. Równania falowe dla potencjałów elektrodynamicznych	166
11.3. Dipol Hertza jako elementarne źródło promieniowania	170
11.3.1. Składowe pola em – pojęcie strefy bliskiej i dalekiej	170
11.3.2. Charakterystyka kierunkowa oraz rezystancja promieniowana	174
12. Prowadnice falowe	177
12.1. Klasyfikacja rodzajów pól	178
12.2. Fale TEM	179
12.3. Fale TE	180
12.4. Fale TM	184
12.5. Prowadnice fal TEM	185
12.5.1. Uproszczony model linii mikropaskowej	186
12.5.2. Linia współosiowa	195
12.6. Falowody	203
12.6.1. Falowód prostokątny	203
12.6.2. Falowód cylindryczny	209
12.7. Równanie linii długiej – przypadek linii współosiowej	216
12.7.1. Pojemność i indukcyjność na jednostkę długości	217
12.7.2. Równania linii długiej	218
Dodatek matematyczny	223
Literatura	225
Skorowidz	226

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

\vec{A}, \tilde{A}	-	potencjał wektorowy i jego amplituda zespolona
\vec{B}, \tilde{B}	-	wektor indukcji magnetycznej i jego amplituda zespolona
$B_{in}(\theta, \varphi)$	-	składowa normalna do powierzchni granicznej wektora \vec{B} w ośrodku i
div	-	dywergencja
$d\vec{l}, d\vec{s}$	-	skierowane elementy: odległości i powierzchni
\vec{D}, \tilde{D}	-	wektor indukcji elektrycznej i jego amplituda zespolona
\vec{D}_d	-	wektor indukcji elektrycznej w dielektryku
D_{in}	-	składowa normalna do powierzchni granicznej wektora \vec{D} w ośrodku i
$\vec{E}(\vec{r}, t)$	-	wartość chwilowa natężenia pola elektrycznego
\vec{E}, \tilde{E}	-	wektor natężenia pola elektrycznego i jego amplituda zespolona
E_{in}	-	składowa normalna do powierzchni granicznej wektora \vec{E} w ośrodku i
$f_{gr.}$	-	częstotliwość graniczna rodzaju pola
$grad$	-	gradient
$\vec{H}(\vec{r}, t)$	-	wartość chwilowa natężenia pola magnetycznego
\vec{H}, \tilde{H}	-	wektor natężenia pola magnetycznego i jego amplituda zespolona
\vec{H}_m	-	wektor natężenia pola magnetycznego w ośrodku materialnym
$\vec{i}_r, \vec{i}_\theta, \vec{i}_\varphi$	-	wersory układu współrzędnych sferycznych
$\vec{i}_\rho, \vec{i}_\varphi, \vec{i}_z$	-	wersory układu współrzędnych cylindrycznych
$\vec{i}_x, \vec{i}_y, \vec{i}_z$	-	wersory układu współrzędnych prostokątnych
I	-	natężenie prądu elektrycznego
j	-	jednostka urojona $j^2 = -1$
\vec{J}_m	-	gęstość powierzchniowa prądu magnetycznego
$J_m(x)$	-	funkcja Bessela pierwszego rodzaju rzędu m argumentu x
\vec{J}_s, \vec{J}_v	-	gęstości prądu przewodzenia: powierzchniowa i objętościowa
\vec{J}_p	-	gęstość powierzchniowa prądu polaryzacyjnego
k	-	liczba falowa, długość wektora falowego
\vec{k}, k_x, k_y, k_z	-	wektor falowy i jego współrzędne w układzie kartezjańskim
\vec{n}	-	wektor normalny do danej powierzchni

$N_m(x)$	–	funkcja Neumanna m -tego rzędu argumentu x
\vec{o}	–	wersor określający kierunek odbitej fali płaskiej
p	–	poprzeczna liczba falowa fal TE lub TM
$p_{v,śr.}$	–	wartość średnia gęstości objętościowej mocy przekazanej przez pole naładowanym cząsteczkom
\vec{p}	–	wersor określający kierunek padającej fali płaskiej
\vec{P}	–	wektor polaryzacji
$r'(x', y', z')$	–	punkt źródła pola
$r(x, y, z)$	–	punkt pola (punkt, w którym obserwujemy pole)
\vec{R}, R	–	wektor skierowany od źródła pola do punktu pola oraz jego długość
$R_{prom.}$	–	rezystancja promieniowania anteny
rot	–	rotacja
\vec{S}	–	wektor Poyntinga
$\vec{S}_{śr.}$	–	wartość średnia wektora Poyntinga
SEM	–	siła elektromotoryczna indukcji
TE, TM	–	fale (rodzaje pola) poprzeczne: elektrycznie i magnetycznie
TEM	–	fala (rodzaj pola) poprzecznie elektryczna i magnetyczna
T_E	–	współczynnik transmisji dla pola elektrycznego
T_H	–	współczynnik transmisji dla pola magnetycznego
U_E	–	potencjał elektrostatyczny
v_f	–	prędkość fazowa
v_g	–	prędkość grupowa
W, w_v	–	energia oraz jej gęstość objętościowa
WFS	–	współczynnik fali stojącej
$w_{e,śr.}, w_{m,śr.}$	–	wartości średnie gęstości objętościowych energii zmagazynowanych w polach: elektrycznym i magnetycznym
Z_s	–	impedancja powierzchniowa
Z_z	–	impedancja w danym przekroju z
Z_0	–	impedancja charakterystyczna przewodnicy falowej
Z_{TE}, Z_{TM}, Z_{TEM}	–	impedancje falowe fal TE, TM oraz TEM
z_0	–	impedancja próżni
$z_{ośr.}$	–	impedancja właściwa ośrodka
α	–	współczynnik tłumienia
β	–	współczynnik fazy
Γ_E, Γ_H	–	współczynniki odbicia dla amplitud pól: elektrycznego i magnetycznego
γ	–	współczynnik propagacji
δ	–	głębokość wnikania
$\varepsilon_0, \varepsilon_d$	–	przenikalności elektryczne: próżni oraz ośrodka
ε_c	–	przenikalność elektryczna zespolona
ε_r	–	względna przenikalność elektryczna materiału

\leftrightarrow	–	tensor przenikalności elektrycznej
ε	–	długość fali, długość fali w przestrzeni nieograniczonej
λ, λ_0	–	długość fali granicznej
$\lambda_{gr.}$	–	przenikalność magnetyczna próżni
μ_0	–	względna przenikalność magnetyczna materiału
μ_r	–	średnia częstość zderzeń ładunków w materiale przewodzącym
ν_c	–	oporność właściwa ośrodka
ρ	–	gęstości: liniowa, powierzchniowa i objętościowa ładunku
ρ_l, ρ_s, ρ_v	–	przewodność właściwa ośrodka
σ	–	czas relaksacji
τ	–	kąty: padania, odbicia i wnikania
$\varphi_{pad.}, \varphi_{odb.}, \varphi_{wn.}$	–	kąt całkowitego wewnętrznego odbicia
φ_{cwo}	–	kąty Brewstera dla polaryzacji prostopadłej i równoległej
$\varphi_{B^\perp}, \varphi_{B^\parallel}$	–	strumień indukcji magnetycznej
Φ	–	podatności: elektryczna i magnetyczna
χ_e, χ_m	–	częstotliwość (pulsacja) kątowa
ω	–	

Przedmowa

Obserwując aktualne trendy rozwoju społeczeństw, stwierdzamy bezsprzecznie, że idea społeczeństwa informacyjnego nie jest tylko hasłem, lecz krok za krokiem jest wdrażana w bardziej i mniej rozwiniętych krajach naszego globu. Nieograniczony (w praktyce) dostęp do internetu poprzez terminale ruchome (smartfony, laptopy) stwarza coraz to nowsze wyzwania dla inżynierów konstruktorów tego sprzętu. Przeciętny użytkownik skupia się na istotnych dla niego cechach sprzętu, takich jak wygląd, pojemność baterii, możliwości wykorzystania do szybkiego przeglądania stron internetowych, oglądania filmów czy też grania w coraz to bardziej wyrafinowane graficznie gry komputerowe. Z punktu widzenia konstruktora, inżyniera elektronika, spełnienie wymagań co do nieskrępowanego, szybkiego dostępu do znacznej ilości danych sprowadza się do rozwiązania problemów transmisji:

- szerokopasmowej (szybka transmisja cyfrowa wymaga szerokiego pasma);
- bezprzewodowej (transmisja bezprzewodowa angażuje fale elektromagnetyczne do przenoszenia informacji).

Jakkolwiek w pierwszym odruchu jesteśmy skłonni traktować te dwie grupy problemów oddzielnie, to po głębszym zastanowieniu znajdujemy ich cechę wspólną, która nie pozwala nam ich tak właśnie traktować. W obu przypadkach mamy bowiem do czynienia z problemami, które wymagają *opisu falowego*, zasadniczo różnego od tradycyjnego (historycznie) opisu obwodowego. Opis falowy wydaje się oczywisty w przypadku transmisji bezprzewodowej – taką łączność zapewniają przecież fale elektromagnetyczne. Jak jednak uzasadnić konieczność stosowania opisu falowego do współczesnych układów elektronicznych?

Tutaj musimy odwołać się do typowego przykładu, który autor zwykle przedstawia na wstępnym wykładzie, aby motywować słuchaczy do studiowania zagadnień polowych. Cechą układów elektronicznych jest ich selektywność częstotliwościowa. Stosuje się pojęcie szerokości względnej pasma, który to parametr wskazuje, w jakim względnym paśmie częstotliwości nasz układ spełnia określone wymagania. I tak, jeśli mówimy, że układ posiada pasmo 10%, to oznacza to np., że w przypadku pracy na częstotliwości środkowej 100 MHz układ będzie prawidłowo pracować w paśmie 10 MHz. A jeśli takie pasmo nie jest wystarczające do przesłania informacji? Jeśli potrzebne jest pasmo np. 50 MHz, to dla tej częstotliwości (100 MHz) nasz układ powinien pracować w paśmie względnym 50%, co nie jest zwykle proste do uzyskania. Dolna częstotliwość pracy będzie teraz wynosiła 75 MHz. Jeśli nasze wymagania co

do pasma będziemy dalej zwiększać, to w końcu napotkamy barierę w dolnej częstotliwości równej zero. Jedynym rozwiązaniem jest przesunięcie pasma pracy w stronę wyższych częstotliwości. Jeśli założymy, że potrzebujemy pasma 50 MHz, to przyjęcie częstotliwości środkowej pracy 500 MHz powoduje, że nasz układ powinien pracować w paśmie względnym 10%, co zwykle nie jest wielkim wyzwaniem.

Ten trywialny przykład ilustruje aktualny trend w zakresie przenoszenia pracy układów elektronicznych w coraz to wyższe zakresy częstotliwości. Tam jednak tradycyjny opis obwodowy, wykorzystujący pojęcia prądu i napięcia, jest nieprzydatny, co będzie przedmiotem rozważań w jednym z rozdziałów książki. W zakresie bardzo wysokich częstotliwości możemy wprawdzie korzystać z pojęć fal prądu i napięcia, ale w pewnych sytuacjach musimy się bezpośrednio odwoływać do klasycznych pojęć polowych: wektorów natężenia/indukcji pola elektrycznego bądź magnetycznego. Stąd też znajomość zjawisk polowych wydaje się niezbędnym elementem wykształcenia współczesnego inżyniera elektronika.

Niniejszy podręcznik jest przeznaczony dla studentów studiów inżynierskich i zawiera zakres wiedzy, którym, zdaniem autora, powinien dysponować każdy inżynier elektronik. Wiedza z dziedziny elektrodynamiki sprawia studentom wiele kłopotów, co wynika z konieczności stosowania aparatu matematycznego z szeregu działów matematyki, takich jak rachunek wektorowy, różniczkowy, całkowy, również w dziedzinie liczb zespolonych. Wykorzystuje się tutaj również elementy rachunku operatorowego oraz teorii równań różniczkowych. Jeśli wykładowca nie przybliży zjawisk fizycznych stojących za prezentowanymi wzorami i zależnościami i nie wskaże przykładów występowania omawianych zjawisk w praktyce, to istnieje duże niebezpieczeństwo, że studenci potraktują wykład jako kolejny wykład zawierający „czystą” teorię, który należy po prostu zaliczyć i o nim zapomnieć. Z tego też względu tam, gdzie tylko było to możliwe, autor starał się w formie komentarza lub przykładów praktycznych pokazać sens fizyczny i znaczenie dla praktyki inżynierskiej prezentowanych zależności analitycznych. Również tam, gdzie było to możliwe, pokazywano związki pomiędzy podejściem polowym a teorią obwodów, która jest przecież szczególnym przypadkiem ogólnej teorii elektromagnetyzmu. Autor ma nadzieję, że taka forma podręcznika pozwoli Czytelnikowi łatwiej przyswoić sobie złożone niekiedy zagadnienia polowe.

Jest jeszcze inny istotny aspekt prezentacji aspektów fizycznych zagadnień polowych. Współczesne narzędzia analizy i projektowania układów bardzo wysokich częstotliwości (w tym również anten) to złożone środowiska obliczeniowe, które często rozwiązują wprost równania Maxwella wykorzystujące zaawansowane metody numeryczne. Aby jednak uzyskać prawidłowe rozwiązanie, należy niekiedy umiejętnie dobrać szereg parametrów obliczeniowych. Nieprawidłowy ich dobór może skutkować uzyskaniem rozwiązań niefizycznych. W tej sytuacji inżynier stosujący te narzędzia powinien umieć ocenić, czy uzyskane rozwiązanie jest prawdopodobne, czy też nie. Taką ocenę można sformułować, jeśli rozumiemy zjawiska fizyczne występujące w analizowanym układzie. Tak więc zależności analityczne, które będziemy prezentować, to nie tylko narzędzia do oceny ilościowej zjawisk polowych, ale również klucz do zrozumienia specyficznych cech zjawisk, które te zależności opisują.

Zanim omówimy pokrótce zawartość podręcznika, należy podkreślić, że przedstawia on podstawy *elektrodynamiki klasycznej*. Oznacza to w praktyce, że przyjmujemy kilka podstawowych założeń:

- prawa elektromagnetyzmu będą analizowane w przybliżeniu niekwantowym;
- energia się będzie rozchodzić w postaci fal;
- zależności od czasu wszystkich analizowanych wielkości będą zdeterminowane.

Przedstawione powyżej uwagi miały wpływ na organizację tekstu podręcznika. Interpretacja zależności matematycznych wymaga znajomości sensu fizycznego występujących tam pojęć. Z tego też względu w pierwszym rozdziale omówiono podstawowe (zdaniem autora) pojęcia opisujące własności pól fizycznych. Założono przy tym, że Czytelnik ma wiedzę z zakresu podstaw rachunku różniczkowego, całkowego, algebry liczb zespolonych czy też układów współrzędnych ortogonalnych. Dla tych, którzy mogą mieć wątpliwości co do swoich kompetencji w zakresie tych działów matematyki, w dodatku matematycznym przedstawiono kompendium wiedzy z tych tematów.

W rozdziale pierwszym zdefiniowano więc i omówiono pojęcia dywergencji, rotacji oraz gradientu. Przedstawiono i zinterpretowano twierdzenia: Gaussa (zwane niekiedy twierdzeniem Gaussa–Ostrogradskiego) oraz Stokesa. W oparciu o ww. pojęcia podano ogólnie przyjętą klasyfikację pól wektorowych. Pokazano pewne zalety stosowania rachunku operatorowego, w którym operator Hamiltona traktuje się jak wektor. W końcu przedstawiono ogólnie przyjętą konwencję opisu zjawisk polowych dotyczącą notacji punktów: (i) gdzie umieszczono źródło pola oraz (ii) gdzie obserwujemy pole przez to źródło wytworzone.

W kolejnym, drugim rozdziale zdefiniowano i omówiono pola: elektryczne i magnetyczne. Jakkolwiek w ujęciu fizycznym skupiamy się na oddziaływaniach na ładunki dyskretne (elementarne), w praktycznej elektronice wygodnie jest operować pojęciem materii ciągłej. Takie podejście w odniesieniu do wykorzystywanego obecnie pasma częstotliwości jest możliwe i zostało zaprezentowane w odniesieniu do prawa Coulomba czy też prawa sił Lorentza.

Trzeci rozdział przedstawia równania Maxwella w próżni. Omówiono w nim ich sens fizyczny i zilustrowano je odpowiednio dobranymi przykładami. Oprócz postaci całkowitej przedstawiono również postaci różniczkową oraz wykorzystującą notację amplitud zespolonych. Wszystkie te postaci są wykorzystywane w analizie zjawisk polowych, a odpowiedni ich dobór może zasadniczo uprościć rozwiązanie analizowanego problemu.

W rozdziale czwartym omawiamy modele przewodnika idealnego i rzeczywistego oraz dielektryka, wprawdzie przybliżone, ale z wystarczającą dokładnością. Zjawiska polowe w nich zachodzące zmuszają nas do modyfikacji definicji wektorów natężeń i indukcji: elektrycznej i magnetycznej. Tutaj też wprowadzimy powszechnie wykorzystywane pojęcia przenikalności względnej czy też przenikalności zespolonej oraz zaproponujemy kryteria klasyfikacji ośrodków na dielektryki i przewodniki. W końcowej części rozdziału omówimy wybrane własności ośrodków materialnych, które nie występują dla próżni, a z którymi mamy do czynienia na co dzień przy analizie zjawisk polowych.

Wprowadzenie opisu własności ośrodków materialnych umożliwia rozważenie istotnego zagadnienia, jakim jest zachowanie się wektorów natężeń pól i indukcji na granicy różnych ośrodków. Temu zagadnieniu poświęcono rozdział piąty. Ma ono kapitalne znaczenie przy analizie zjawisk propagacji fal elektromagnetycznych i jest szeroko

wykorzystywane we współczesnej elektronice (np. w zagadnieniach kompatybilności elektromagnetycznej). W rozdziale tym pokażemy również, jak można wykorzystać warunki przy granicy idealnego przewodnika przy rozwiązywaniu szeregu problemów praktycznych.

Kolejny, szósty rozdział omawia bilans mocy i energii dla fal pól elektrycznego i magnetycznego. Wychodząc z ogólnego sformułowania zasady zachowania energii, wprowadzamy bilans mocy, wykorzystując przy tym pojęcie strumienia gęstości mocy (wektor Poyntinga). W tym miejscu pokażemy związki bilansu mocy i energii dla pól elektrycznego i magnetycznego z bilansem mocy i energii sformułowanym dla prostego obwodu elektrycznego.

Kolejne dwa rozdziały dotyczą rozwiązania równań Maxwella dla przypadku statycznego (częstotliwość równa zero) i dynamicznego (częstotliwość różna od zera). W przypadku statycznym omówiono zasadność wprowadzenia pojęcia napięcia (różnicy potencjałów) i przedstawiono uproszczone kryterium stosowalności przybliżenia statycznego. W przypadku dynamicznym rozwiązano równania Maxwella w układzie współrzędnych prostokątnych oraz omówiono podstawowe własności uzyskanego rozwiązania (tj. fali płaskiej).

Rozdziały dziewiąty i dziesiąty poświęcono zjawiskom towarzyszącym propagacji fali płaskiej w ośrodkach rzeczywistych (w dielektrykach i przewodnikach) oraz przy padaniu fali płaskiej na granicę ośrodków. Znajomość efektów tam występujących pozwala zrozumieć np. funkcjonowanie światłowodów czy też zasad działania warstw antyrefleksowych powszechnie stosowanych w okularach.

Kolejny rozdział poświęcono równaniom Maxwella w obecności źródeł. Można go traktować jako wstęp teoretyczny do teorii anten. Przedstawiono w nim rozwiązanie dla elementarnej anteny liniowej (dipola Hertza) i wprowadzono podstawowe pojęcia techniki antenowej.

Ostatni, dwunasty rozdział dotyczy przewodnic falowych, ich teorii oraz rozwiązań praktycznych. Omówiono w nim najczęściej stosowane linie współosiowe, falowody (prostokątne i kołowe), a także przykładową prowadnicę planarną (linię mikropaskową). Tematyka przewodnic falowych w dobie powszechnej miniaturyzacji jest bardzo ważna, lecz ze względu na ograniczone ramy podręcznika skupiono się na jej prostym modelu, pozwalającym jednak zauważyć jej istotne własności.

Na zakończenie warto wspomnieć, że najlepszą formą utrwalenia wiedzy, zarówno teoretycznej, jak i praktycznej, jest rozwiązywanie odpowiednio dobranych zadań. Autor proponuje rozważyć Czytelnikowi studiowanie problemów zawartych w dwóch pozycjach książkowych, w których powstaniu miał okazję uczestniczyć:

- Piotr Kowalczyk, Rafał Lech, Włodzimierz Zieniutycz, Podstawy elektromagnetyzmu w zadaniach, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2015;
- Piotr Kowalczyk, Rafał Lech, Włodzimierz Zieniutycz, Pola i fale elektromagnetyczne w zadaniach, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2017.

Będzie to wartościowym uzupełnieniem zawartości niniejszego podręcznika, w którym, ze względu na ograniczenia edytorskie, pominięto dokładną analizę pewnej liczby standardowych zagadnień z zakresu zjawisk elektromagnetycznych.