

Symulacja propagacji fali w przewodnicach TEM

Arkadiusz Lewandowski
Bartosz Gąsowski
Michał Kalisiak

Zakład Układów i Aparatury Mikrofalowej
Instytut Systemów Elektronicznych
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Warszawa, 20 listopada 2022

1 Wprowadzenie

W niniejszym ćwiczeniu przedstawione zostaną podstawowe własności rodzaju TEM na przykładzie podstawowych przewodnic TEM: linii płasko-równoległej i linii współosiowej. Własności te zostaną zbadane z wykorzystaniem symulacji numerycznych w oprogramowaniu ANSYS HFSS.

W niniejszym dokumencie przyjęto następującą konwencję notacyjną odnośnie wektorów i wartości zespolonych, która zostanie krótko przedstawiona na przykładzie wektora natężenia pola elektrycznego. Zespolony wektor natężenia pola elektrycznego jest zapisywany jako:

$$\vec{\mathbf{E}} = \vec{i}_x \mathbf{E}_x + \vec{i}_y \mathbf{E}_y + \vec{i}_z \mathbf{E}_z$$

gdzie \mathbf{E}_x , \mathbf{E}_y , \mathbf{E}_z są składowymi x , y , z tego wektora, zaś \vec{i}_x , \vec{i}_y , \vec{i}_z są wersorami układu współrzędnych. Zespolone składowe wektora $\vec{\mathbf{E}}$ (czyli wskazy) mają postać $\mathbf{E}_x = E_x e^{j\varphi_x}$, $\mathbf{E}_y = E_y e^{j\varphi_y}$ i $\mathbf{E}_z = E_z e^{j\varphi_z}$, stąd wektor natężenia pola elektrycznego dla zadanej pulsacji ω i chwili czasowej t ma wartość:

$$\vec{E} = \text{Re}[\vec{\mathbf{E}} e^{j\omega t}] = \vec{i}_x E_x \cos(\omega t + \varphi_x) + \vec{i}_y E_y \cos(\omega t + \varphi_y) + \vec{i}_z E_z \cos(\omega t + \varphi_z).$$

Przy zapisie wielkości skalarnych innych niż składowe pola, nie będzie czyniona różnica w zapisie między wartościami zespolonymi i rzeczywistymi, zaś rodzaj wartości będzie wynikał z kontekstu.

W tekście instrukcji będą pojawiały się odniesienia do towarzyszącego instrukcji dokumentu *Krótkie wprowadzenie do programu HFSS*. Odniesienia te będą oznaczane ikonką jak po prawej stronie tego akapitu z numerem podpunktu lub rysunku poniżej ikonki. Przed wykonaniem ćwiczenia warto zapoznać się z treścią tego wprowadzenia, choć nie jest to konieczne.



2 Podstawy teoretyczne

W tym punkcie krótko podsumowano własności rodzaju TEM w przewodnicach falowych. Przedstawiono podstawowe zależności słuszne dla dowolnej przewodnicy TEM, a następnie omówiono własności przewodnic rozważanych w tym ćwiczeniu: linii płasko-równoległej oraz współosiowej.

2.1 Uwagi ogólne

Przewodnice TEM jest to klasa przewodnic, w których może się rozchodzić rodzaj TEM, to znaczy fala elektromagnetyczna, która nie posiada składowych pola wzdłuż kierunku propagacji¹. Akronim opisujący tę klasę przewodnic pochodzi ze sformułowania w języku ang. *Transverse Electro-Magnetic*, opisującego fakt, że pole elektryczne i magnetyczne w rodzaju TEM znajduje się jedynie w przekroju prostopadłym do kierunku propagacji fali.

Rodzaj TEM może się rozchodzić jedynie w przewodnicach o liczbie przewodów większej niż jeden, z czego wynika, że np. w falowodach prostokątnych czy kołowych nie jest możliwe rozchodzenie się tego rodzaju. W ogólności rodzaj TEM może propagować jedynie w przewodnicach wykonanych z bezstratnych przewodów i z jednorodnym dielektrykiem. W liniach transmisyjnych, które zawierają więcej niż jeden przewód, ale nie spełniają pozostałych warunków rozchodzą się rodzaje quasi-TEM, które mają „niewielkie” składowe wzdłużne pola. Rodzaje TEM i quasi-TEM nie mają – w przeciwieństwie do rodzajów falowodowych – dolnej częstotliwości granicznej.

Aby opisać przestrzenny rozkład pola w przewodnicy TEM, załóżmy dla ustalenia uwagi, że fala rozchodzi się wzdłuż osi $0z+$ (czyli przekrój linii znajduje się w płaszczyźnie $0xy$). Rozkład pola elektrycznego i magnetycznego można wtedy zapisać jako:

$$\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{E}}_{\perp} e^{-\gamma z} \quad (1)$$

$$\vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{H}}_{\perp} e^{-\gamma z} \quad (2)$$

gdzie wektory $\vec{\mathbf{E}}_{\perp}$ i $\vec{\mathbf{H}}_{\perp}$ opisują rozkład pola w przekroju przewodnicy, a zatem – dla przyjętych założeń odnośnie kierunku propagacji – nie zawierają składowej z . Zespolona liczba γ to współczynnik propagacji, który jest dany wzorem:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (3)$$

¹W przewodnicach takich zazwyczaj mogą się też rozchodzić rodzaje, które mają składowe wzdłużne pola: są to rodzaje falowodowe cechujące się m.in. dolną częstotliwością graniczną. Z punktu widzenia praktycznego, niepożądane jest przesyłanie sygnału na kilku rodzajach, gdyż może to powodować zniekształcenia wynikające z różnic w prędkościach propagacji poszczególnych rodzajów (tzw. dyspersja modowa). Stąd też przewodnice TEM są w praktyce użyteczne do pewnej częstotliwości granicznej, powyżej której pojawiają się pasywnośćne rodzaje falowodowe.

gdzie wielkości μ , ε oraz σ to, odpowiednio, przenikalność magnetyczna i elektryczna ośrodka oraz jego przewodność. Pierwsze dwa parametry ośrodka zapisuje się często jako iloczyny

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (4)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (5)$$

gdzie ε_0 i μ_0 to przenikalność elektryczna i magnetyczna próżni, zaś ε_r i μ_r to tzw. względne przenikalności rozważanego ośrodka. Między składowymi poprzecznymi pola \vec{E}_\perp i \vec{H}_\perp zachodzą dalej zależności:

$$\vec{H}_\perp = \frac{\vec{i}_z \times \vec{E}_\perp}{Z} \quad (6)$$

$$\vec{E}_\perp = Z \vec{H}_\perp \times \vec{i}_z \quad (7)$$

gdzie zespolona liczba Z to impedancja falowa ośrodka dana wzorem:

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad (8)$$

Jak widać z powyższego zapisu, wektory \vec{E} i \vec{H} są do siebie prostopadłe i też prostopadłe do kierunku propagacji fali. W ogólności odpowiednie składowe tych wektorów są względem siebie przesunięte w fazie ze względu na zespolony charakter impedancji falowej (8).

Dla przewodnicy TEM z bezstratnym dielektrykiem ($\sigma=0$), wzory (3) i (8) upraszczają się do postaci:

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon} = j\frac{\omega}{c}\sqrt{\mu_r\varepsilon_r} \quad (9)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \eta\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \quad (10)$$

gdzie η to impedancja falowa próżni wynosząca $120\pi [\Omega]$, natomiast c to prędkość światła w próżni. Jak widać, impedancja falowa jest wtedy liczbą rzeczywistą, a zatem odpowiednie składowe pól \vec{E}_\perp i \vec{H}_\perp są zgodne w fazie, a między zespolonymi wektorami obydwu pól zachodzi związek:

$$\frac{|\vec{E}_\perp|}{|\vec{H}_\perp|} = Z \quad (11)$$

Powierzchniowa gęstość mocy przenoszonej przez falę elektromagnetyczną jest wyrażona wektorem Poyntinga. Dla zespolonego zapisu pól elektromagnetycznych definiuje się zespolony wektor Poyntinga jako:

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^*$$

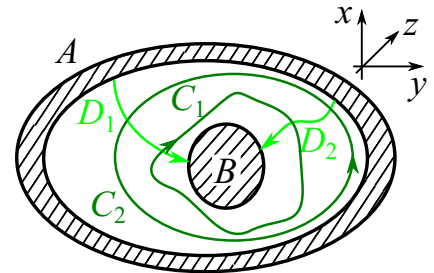
gdzie indeks górny $*$ oznacza sprzężenie liczby zespolonej. Dla ośrodków izotropowych wektor ten jest prostopadły do wektorów \vec{E} i \vec{H} i zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali. Część rzeczywista tego wektora ma sens fizyczny średniej (za okres) gęstości mocy przenoszonej przez falę elektromagnetyczną. A zatem średnia moc przenoszona przez falę elektromagnetyczną przez przekrój przewodnicy może być wyrażona jako całka powierzchniowa:

$$P = \text{Re} \iint_S \vec{S} \cdot d\vec{s} \quad (12)$$

gdzie S jest przekrojem przewodnicy.

Operowanie rozkładami pól jest w praktyce mało wygodne. Dlatego wprowadza się parametry obwodowe przewodnic, które pozwalają wykorzystać znaną teorię linii długich. W tym celu definiuje się napięcie, prąd i impedancję charakterystyczną przewodnicy. Napięcie (a dokładniej jego wskaz dla zespolonego zapisu pól) między przewodami A i B przewodnicy TEM definiuje się jako całkę z natężenia pola elektrycznego po drodze łączącej te przewody (patrz Rys. 1):

$$U = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (13)$$



Rysunek 1: Przekrój przykładowej przewodnicy TEM z zaznaczonymi ścieżkami całkowania.

Droga ta powinna znajdować się całkowicie w przekroju przewodnicy. Okazuje się, że ze względu na bezwirowość rozkładu pola elektrycznego w rodzaju TEM w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji, napięcie nie zależy od drogi całkowania. Stąd dla dróg D_1 i D_2 na Rys. 1 otrzymamy tę samą wartość napięcia. Wskaz prądu płynącego przez przewód linii definiuje się jako całkę z natężenia pola magnetycznego po drodze zamkniętej otaczającej ten przewód²:

$$I = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (14)$$

Droga ta podobnie jak w przypadku wyznaczania napięcia powinna znajdować się całkowicie w przekroju linii. Ponadto, z bezwirowości pola magnetycznego w rodzaju TEM w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji wynika, że prąd ten nie zależy od drogi całkowania. Dlatego też dla krzywych C_1 i C_2 na Rys. 1 otrzymamy tę samą wartość prądu.

Impedancja charakterystyczna Z_0 jest ważnym parametrem przewodnic TEM. Można ją definiować na kilka sposobów, dla celów tego ćwiczenia przyjmujemy definicję:

$$Z_0 = \frac{U}{I} \quad (15)$$

Impedancja ta jest funkcją geometrii przewodnicy oraz parametrów ośrodka ją wypełniającego. W kolejnych punktach zostaną przedstawione zależności dla przewodnic wykorzystywanych w tym ćwiczeniu. Można dalej pokazać, że dla przewodnic TEM średnią moc przenoszoną przez przewodnicę można równoważnie do (12) zapisać jako:

$$P = \frac{1}{2} \text{Re}[UI^*] \quad (16)$$

co jest analogią wzoru znanego z teorii obwodów określającego średnią moc czynną wydzielaną w dwójniku.

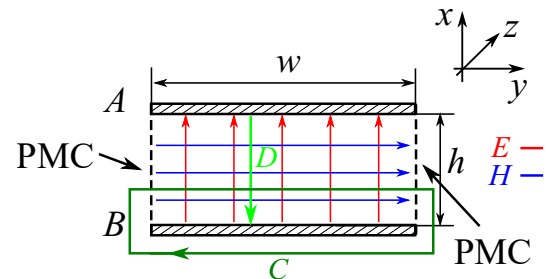
2.2 Linia płasko-równoległa

Przekrój linii płasko-równoległej przedstawiono na Rys. 2. Linia ta składa się z dwóch równoległych przewodów A i B zrealizowanych z idealnego przewodnika elektrycznego (ang. *Perfect Electric Conductor*) nazywanego też w skrócie ścianką elektryczną) o szerokości w i oddalonych od siebie o h . Boczne ścianki linii zbudowane są z idealnego przewodnika magnetycznego (ang. *Perfect Magnetic Conductor*, nazywanego też w skrócie ścianką magnetyczną)³. Z warunków brzegowych dla ścianki elektrycznej wynika, że na jej powierzchni może istnieć tylko składowa normalna pola elektrycznego i składowa styczna pola magnetycznego. Ścianka magnetyczna zachowuje się dualnie w stosunku do ścianki elektrycznej: na jej powierzchni może istnieć tylko składowa normalna pola magnetycznego i składowa styczna pola elektrycznego. Linia jest wypełniona dielektrykiem o parametrach ϵ_r , μ_r i σ . W poniższych rozważaniach zakładamy bezstratność dielektryka ($\sigma = 0$).

Na Rys. 2 przedstawiono też rozkład pola elektrycznego i magnetycznego. Widzimy, że ten rozkład jest stały dla obydwu pól, z czego wynika, że można zapisać w przekroju linii:

$$\vec{E}_\perp = E_0 \vec{i}_x \quad (17)$$

$$\vec{H}_\perp = H_0 \vec{i}_y \quad (18)$$



Rysunek 2: Przekrój linii płasko-równoległej z zaznaczonymi rozkładami pola i drogami D i C do wyznaczania napięcia i prądu w linii.

²Strzałkowanie prądu określa się z reguły śruby prawoskrętnej: dla dróg zaznaczonych na Rys. 1 prądy zgodne ze zwrotem osi $0z$ będą miały znak '+'.
³Warto tu dodać, że o ile dobrym przybliżeniem ścianki elektrycznej jest przewodnik o dużej wartości przewodności, o tyle ścianki magnetycznej nie można zrealizować w praktyce. W przypadku linii płasko-równoległej przybliża warunki ścianki magnetycznej otwartymi bocznymi ściankami linii. Wtedy jednak pojawiają się składowe obydwu pól znajdujące się poza przekrojem linii, zatem takie przybliżenie jest tym lepsze im większy jest stosunek w/h .

przy czym z (11) mamy, że $E_0/H_0 = Z$. Można więc myśleć o rozkładzie pola w linii płasko-równoległej jako o wycinku rozkładu pola dla fali płaskiej. Korzystając z Rys. 2 policzmy parametry obwodowe tej przewodnicy. Zakładając amplitudę pola elektrycznego E_0 i wybierając drogę całkowania D od przewodnika A do przewodnika B równoległą do osi $0x$, dostajemy ze wzoru (13):

$$U = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_D \vec{i}_x E_0 \cdot (-\vec{i}_x dl) = E_0 h \quad (19)$$

Obliczając z kolei z równania (14) prąd płynący przez przewód B całkujemy po zamkniętej drodze C , której fragment C' przechodzący przez przekrój linii jest równoległy do osi $0y$. Zakładając amplitudę pola magnetycznego H_0 i zauważając, że pole natężenie pola magnetycznego poza przekrojem linii jest zerowe, otrzymujemy:

$$I = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{C'} \vec{i}_y H_0 \cdot (\vec{i}_y dl) = H_0 w \quad (20)$$

Korzystając następnie z zależności (11) między amplitudą pola elektrycznego i magnetycznego, możemy zapisać $H_0 = E_0/Z$ co podstawieniu do (20) i obliczeniu impedancji charakterystycznej z (15) daje nam:

$$Z_0 = \frac{h}{w} Z \quad (21)$$

Widzimy więc, że impedancja charakterystyczna jest funkcją parametrów ośrodka wypełniającego linię i jej wymiarów.

2.3 Linia współosiowa

Przekrój linii współosiowej wraz z zaznaczonymi rozkładami pola jest przedstawiony na Rys. 3. Linia ta składa się z dwóch przewodów wykonanych z idealnego przewodnika o promieniach a i b umieszczonych współosiowo względem siebie. Obszar między przewodami jest wypełniony dielektrykiem o parametrach ϵ_r , μ_r i σ (w poniższych rozważaniach zakładamy bezstratność dielektryka, tj. $\sigma = 0$). Linia taka jest bardzo często wykorzystywana w praktyce, np. jako linia współosiowa zrealizowane są przewody do telewizji kablowej i satelitarnej.

Rozkład pola w linii współosiowej najwygodniej opisuje się we współrzędnych cylindrycznych. Dla natężenia pola elektrycznego można zapisać w przekroju linii:

$$\vec{E}_\perp = E_0 \frac{1}{\rho} \vec{i}_\rho \quad (22)$$

$$\vec{H}_\perp = H_0 \frac{1}{\rho} \vec{i}_\phi \quad (23)$$

gdzie ρ jest odległością od środka linii, a wektory \vec{i}_ρ i \vec{i}_ϕ są wersorami cylindrycznego układu współrzędnych (zakładamy, że oś $0z$ jest połączona w osi układu) i oczywiście zgodnie z (11) zachodzi $E_0/H_0 = Z$. Widzimy zatem, że natężenia obydwu pól maleją odwrotnie proporcjonalnie do odległości od środka linii, a wektory obydwu pól są do siebie prostopadłe.

Na podstawie powyższego zapisu łatwo możemy wyznaczyć napięcie i prąd (pozostawiamy to Czytelnikowi do samodzielnego wyprowadzenia) całkując po zaznaczonych na Rys. 3 drogach D i C :

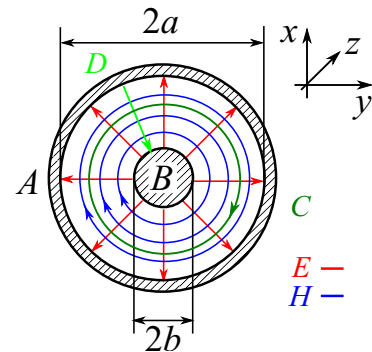
$$U = E_0 \ln \frac{a}{b} \quad (24)$$

$$I = 2\pi H_0 \quad (25)$$

co daje nam ostatecznie wzór na impedancję charakterystyczną linii współosiowej:

$$Z_0 = Z \frac{1}{2\pi} \ln \frac{a}{b} \quad (26)$$

W praktyce parametry linii współosiowej (średnice przewodów i przenikalność elektryczną dielektryka) często dobiera się tak, aby impedancja charakterystyczna miała wartość 50Ω lub 75Ω . W symulacjach prowadzonych w tym ćwiczeniu nie będziemy się jednak ograniczali do tego przypadku.



Rysunek 3: Przekrój linii współosiowej z zaznaczonymi rozkładami pola oraz drogami całkowania D i C do wyznaczania napięcia i prądu w linii.

3 Praca domowa

Na podstawie załączonych w osobnym pliku indywidualnych wartości A i B przypisujemy następujące wymiary (w milimetrach) analizowanym strukturom:

- linia płasko równoległa: $w = A$, $h = B$;
- linia współosiowa $a = A$, $b = B$.

W ramach pracy domowej na podstawie tych wymiarów należy wykonać następujące czynności:

1. Obliczyć impedancję charakterystyczną dla analizowanych linii przy zadanych wymiarach (zakładając, że ośrodkiem jest próżnia) i umieścić wartości w specjalnej formacie dołączonej do tego ćwiczenia.
2. Obliczyć długość fali we wszystkich przewodnicach dla powietrza i teflonu (przyjając $\varepsilon_r = 2.1$) oraz częstotliwości 3 GHz i 6 GHz i umieścić w formacie.

Przeprowadzone obliczenia należy umieścić w osobnym sprawozdaniu, które zaleca się wykonywać elektronicznie (podczas laboratorium konieczne będzie wklejanie rysunków do sprawozdania). Końcową wersję sprawozdania w formacie PDF należy dostarczyć pod koniec ćwiczenia.

4 Laboratorium

W tej części opisano zadania symulacyjne do wykonania podczas laboratorium. Przed wykonaniem tej części należy wykonać pracę domową z poprzedniego punktu. Wyniki obliczeń należy umieścić w specjalnej formacie dołączonej do tego ćwiczenia. Obliczenia, wnioski i rysunki skopiowane z programu *ANSYS Electronics Desktop* należy umieszczać w osobnym sprawozdaniu, korzystając z wybranego edytora tekstu. Rysunki należy wklejać do sprawozdania tylko wtedy, gdy pojawi się podkreślone polecenie wykonania takiej czynności. Należy również pamiętać o umieszczeniu w sprawozdaniu zwięzłych odpowiedzi na pytania wyróżnione w tekście *kursywą*. Sprawozdanie to należy pod koniec ćwiczenia przesłać (koniecznie w formacie PDF) na adres podany przez prowadzącego.

4.1 Linia płasko-równoległa

W tej części symulowany będzie odcinek linii płasko-równoległej o wymiarach przyjętych w pracy domowej. W symulatorze – odmiennie do Rys. 2 – linia jest zorientowana wzdłuż osi Oy , tj. jej przekrój znajduje się w płaszczyźnie Oxz . Pobudzenie linii znajduje się też w tej płaszczyźnie, zaś drugi koniec linii jest zamknięty warunkiem absorpcji – który symuluje wydłużenie linii w „nieskończoność”.

4.1.1 Obserwacja rozkładów wielkości polowych

1. Narysować skalarny rozkład natężenia pola E i H w płaszczyźnie pobudzenia (płaszczyzna Oxz) dla częstotliwości 3 GHz i 6 GHz. Oszacować średnie wartości natężenia obydwu pól i wpisać do formatki.

Płaszczyznę rysowania rozkładu pola wybiera się w okienku modelu w gałęzi *Planes*. Rozkład natężenia pola E i H w wybranej płaszczyźnie rysuje się wybierając pozycje *Mag_E* i *Mag_H* w menu kontekstowym *Plot Fields*. Częstotliwości dla której jest rysowany rozkład można łatwo zmienić zaznaczając rozkład w drzewie projektu i wpisując nową wartość częstotliwości w okienku właściwości.

Czy rozkład pola w przekroju linii zależy od częstotliwości? Z jaką dokładnością wyznaczone są średnie wartości natężenia obydwu pól?

2. Narysować wektorowy rozkład natężenia pola E i H w płaszczyźnie pobudzenia (płaszczyzna Oxz) dla częstotliwości 3 GHz i 6 GHz. Wkleić rysunek do sprawozdania

Wektorowy rozkład natężenia pola rysuje się wybierając pozycje *Vector_E* i *Vector_H* w menu kontekstowym *Plot Fields*. Rysunek rozkładu wraz ze skalą kopiuje się do schowka w menu kontekstowym *Copy Image*. Pozostałe operacje jak w poprzednim punkcie.



4.1, Rys. 5,
Rys. 6,
Rys. 7



4.1, Rys. 5,
Rys. 6,
Rys. 7

Które składowe pola są zerowe? Potencjał którego z przewodów linii byłby większy przy obserwowanym rozkładzie pola, gdybyśmy rozważali przypadek DC?

3. Narysować skalarny i wektorowy rozkład natężenia pola E i H wzdłuż linii (płaszczyzna Oyz) dla częstotliwości 3 GHz i 6 GHz. Wkleić do sprawozdania rysunki dla rozkładów wektorowych. Oszacować długość fali i wpisać do formatki.

Rysowanie rozkładów pola odbywa się jak w poprzednich podpunktach. W celu oszacowania długości fali warto obrócić strukturę tak, aby płaszczyzna Oyz był w płaszczyźnie ekranu oraz była płaszczyzną rysowania elementów. W celu pomiaru odległości można wykorzystać przycisk *Measure* w pasku narzędziowym z opcją *Position*, wyłączając też na czas pomiaru przyciąganie do siatki (przyciski po prawej stronie okienka wyboru płaszczyzny rysowania w pasku narzędziowym).

Jak zmieniła się długość fali ze zmianą częstotliwości? Czy uzyskane wyniki są zgodne z pracą domową? W którym kierunku rozchodzi się fala? Jak będzie wyglądał rozkład po upływie czasu $T/4$, gdzie T jest okresem sygnału sinusoidalnego pobudzającego przewodnicę?

4. Narysować wektorowy rozkład części rzeczywistej zespolonego wektora Poyntinga w płaszczyźnie pobudzenia linii (płaszczyzna Oxz). Oszacować średnią wartość długości części rzeczywistej tego wektora i wpisać do formatki.

Rozkład części rzeczywistej wektora Poynting rysuje się tak jak rozkłady pól – wybierając pozycję *Vector_RealPoynting* w menu kontekstowym *Plot Fields*

Jaka jest relacja między zwrotem wektora Poynting a kierunkiem propagacji fali? Jaka jest relacja między wektorami natężenia pól E i H a wektorem Poyntinga? Jak oszacować średnią wartość tego wektora z wyznaczonych wcześniej średnich wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego?

5. Przeprowadzić animację zmiany rozkładu pól E i H dla wyznaczonych wcześniej rozkładów.

W celu przeprowadzanie animacji, należy najpierw wybrać rozkłady, które mają być pokazane w animacji (opcja *Plot Visibility* w menu kontekstowym rozkładu pola). Najlepszy efekt daje animacja wektorowych rozkładów pól E i H wzdłuż linii. Następnie należy ustalić parametry animacji (opcja *Animate* w menu kontekstowym dowolnego rozkładu pola) i rozpocząć animację. Program potrzebuje chwili czasu, żeby wykonać obliczenia po czym animacja się rozpoczyna i pojawia się dodatkowe okienko dialogowe. W tym okienku można m.in. przyspieszyć lub zwolnić animację i w dowolnym momencie ją przerwać. Po rozpoczęciu animacji można włączać i wyłączać pokazywane rozkłady korzystając z opcji *Plot Visibility*

W którym kierunku rozchodzi się fala? Jak określić chwilę czasową, dla której obserwujemy rozkład pola w przewodnicy na podstawie podawanej fazy? Jaką drogę pokonuje fala podczas jednego okresu sygnału pobudzającego?

6. Wykreślić wektorowy rozkład gęstości prądu powierzchniowego na wewnętrznej powierzchni obydwu przewodników.

Przed narysowaniem rozkładu tego wektora, należy zaznaczyć wewnętrzną powierzchnię obydwu przewodników. W tym celu należy przejść w tryb zaznaczania powierzchni (skrót klawiszowy **f**) i kliknąć w wybraną powierzchnię i naciskać klawisz **b**, aż zaznaczona będzie oczekiwana powierzchnia. Rozkład gęstości prądu powierzchniowego rysuje się tak jak rozkłady pól – wybierając pozycję *Vector_Jsurf* w menu kontekstowym *Plot Fields*.

Jaka jest relacja między rozkładami prądu powierzchniowego w obydwu przewodach? W jaki sposób zamykają się linie prądu? Jaka jest relacja między wektorem gęstości prądu powierzchniowego i wektorem natężenia pola magnetycznego w pobliżu przewodnika?

7. Zmienić materiał wypełniający linię na teflon, wykonać ponownie symulację i powtórzyć obserwacje z punktów 1-3, ale już bez wklejania rozkładów pola do sprawozdania.

Dielektryk wypełniający linię jest obiektem oznaczonym nazwą **dielektryk** w drzewie modelu. Zmianę materiału dokonuje się zaznaczając obiekt w drzewie modelu i wybierając w menu kontekstowym pozycję *Assign Material*.



2.3, Rys. 3



4.1



4.1



2.4



2.5.1, 3.1

Jak zmieniła się długość fali po zmianie dielektryka wypełniającego linię? Czy uzyskane wyniki są zgodne z pracą domową? Jak zmieniły się średnie wartości wielkości polowych?

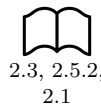
8. Przywrócić materiał wypełniający linię na próżnię i powtórzyć symulację.



4.1.2 Obliczanie parametrów obwodowych linii

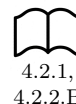
1. Zdefiniować dwie różne ścieżki całkowania (patrz Rys. 2) dla obliczenia napięcia w płaszczyźnie pobudzenia linii (płaszczyzna $0xz$).

Przed rozpoczęciem rysowania ścieżek należy się upewnić, że aktywnym układem współrzędnych jest układ *Global* (gałąź *Coordinate Systems* w okienku modelu), a następnie:



- ustalić widok struktury tak, aby płaszczyzna $0xz$ była w płaszczyźnie ekranu
- upewnić się, że wybór punktów jest ograniczony do płaszczyzny $0xz$
- narysować dwie różne linie (mogą być łamane) łączące obydwa przewody linii (zaczynając od przewodu górnego, czyli *A* zgodnie z Rys. 2)
- nadawać łamanym nazwy, np. **droga1** i **droga2**
- po narysowaniu odnaleźć opisy tych linii w okienku model i upewnić się, że znajdują się w płaszczyźnie $0xz$ (tzn. współrzędna y każdego z punktów ścieżki ma wartość zerową)

2. Obliczyć napięcie wzdłuż tych ścieżek całkowania dla częstotliwości 3 GHz korzystając z kalkulatora pól a wyznaczone wartości wpisać do formatki.



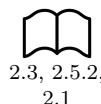
Czy wyznaczone wartości zależą od długości i kształtu ścieżki? Dlaczego? () Jak matematycznie zapisać wyznaczanie długości ścieżki? (*) Czy można tę operację zapisać w kalkulatorze (patrz pozycja *Vector->UnitVec->Tangent* w okienku kalkulatora)?*

3. Obliczyć napięcie ze średniej wartości natężenia pola elektrycznego dla częstotliwości 3 GHz (patrz wzór (19)) i wyznaczoną wartość wpisać do formatki.

Jak wyznaczona w ten sposób wartość ma się do wartości wyznaczonych z całkowania?

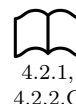
4. Zdefiniować dwie różne zamknięte drogi całkowania (otaczające dolny przewód, patrz Rys. 2) dla obliczenia prądu w płaszczyźnie pobudzenia linii (płaszczyzna $0xz$).

Podobnie jak w przypadku rysowania dróg całkowania dla obliczenia napięcia, przed rozpoczęciem rysowania dróg zamkniętych należy się upewnić, że aktywnym układem współrzędnych jest układ *Global* (gałąź *Coordinate Systems* w okienku modelu), a następnie:



- ustalić widok struktury tak, aby płaszczyzna $0xz$ była w płaszczyźnie ekranu
- upewnić się, że wybór punktów jest ograniczony do płaszczyzny $0xz$
- narysować dwie różne zamknięte łamane otaczające przewód dolny linii (przewód *B* zgodnie z Rys. (2)), zwracając uwagę, aby rysując linie poruszać się zgodnie z ruchem wskazówek zegara
- nadawać drogom zamkniętym nazwy, np. **petla1** i **petla2**
- po narysowaniu odnaleźć opisy narysowanych dróg w okienku model i upewnić się, że znajdują się w płaszczyźnie $0xz$ (tzn. współrzędna y każdego z punktów drogi ma wartość zerową)

5. Obliczyć prąd wzdłuż tych dróg zamkniętych dla częstotliwości 3 GHz korzystając z kalkulatora pól a wyznaczone wartości wpisać do formatki.



Czy wyznaczone wartości zależą od długości i kształtu ścieżki? Dlaczego?

6. Obliczyć prąd ze średniej wartości natężenia pola magnetycznego dla częstotliwości 3 GHz (patrz wzór (20)) i wyznaczoną wartość wpisać do formatki.

Jak wyznaczona w ten sposób wartość ma się do wartości wyznaczonych z całkowania?

7. Z wyznaczonych wartości napięcia i prądu dla pierwszej drogi całkowania obliczyć impedancję charakterystyczną, wpisać do formatki i porównać z wartością obliczoną w pracy domowej.

Jaką wartość stosunku napięcia do prądu zaobserwowalibyśmy dla przypadku prądu stałego (zakładając skończoną długość linii i rozwarcie lub zwarcie na końcu)?

8. Obliczyć moc przenoszoną przez falę z całki powierzchniowej części rzeczywistej wektora Poyntinga (patrz wzór (12)) i wpisać do formatki.

W kalkulatorze podczas obliczeń należy wybrać jako geometrię płaszczyzną $0xz$ (po naciśnięciu przycisku *Input->Geometry* należy w okienku dialogowym wybrać *Surface->Global:XZ*).

9. Obliczyć moc przenoszoną przez falę ze średniej wartości wektora Poyntinga policzonej w poprzednim punkcie (patrz wzór (12)), z iloczynu prądu i napięcia (patrz wzór (16)) i wpisać do formatki i porównać z wartościami obliczonymi w poprzednich podpunktach.

Skomentować różnice między wynikami.



4.2.1,
4.2.2.D

4.2 Linia współosiowa

W tej części symulowany będzie odcinek linii współosiowej o wymiarach przyjętych w pracy domowej. Podobnie jak w przypadku symulacji z poprzedniego punktu, linia jest zorientowana wzdłuż osi $0y$, w płaszczyźnie $0xy$ znajduje się pobudzenie linii, zaś drugi koniec linii jest zamknięty warunkiem absorpcji symulującym wydłużenie linii w „nieskończoność”.

4.2.1 Obserwacja rozkładów wielkości polowych

1. Narysować skalarny rozkład natężenia pola E i H w płaszczyźnie pobudzenia (płaszczyzna $0xz$) dla częstotliwości 3 GHz i 6 GHz.

Rozkład rysuje się korzystając z tych samych poleceń jak w podpunkcie 1 dla linii płasko-równoległej.

Uzasadnić zaobserwowaną zmienność natężenia pola w przekroju linii. Czy rozkład pola zależy od częstotliwości?

2. Narysować wektorowy rozkład natężenia pola E i H w płaszczyźnie pobudzenia (płaszczyzna $0xz$) dla częstotliwości 3 GHz i 6 GHz. Wkleić rysunek do sprawozdania.

Rozkład rysuje się korzystając z tych samych poleceń jak w podpunkcie 2 dla linii płasko-równoległej.

Które składowe obydwu pól są zerowe?

3. Narysować rozkład składowej E_x , E_y i E_z w przekroju linii w płaszczyźnie pobudzenia dla częstotliwości 3 GHz.

Wyrażenia definiujące powyższe składowe pola nie są standardowo zdefiniowane w programie *ANSYS Electronics Desktop* i zostały zdefiniowane dla celów tego ćwiczenia. Aby wyrysować te składowe należy – po zaznaczeniu płaszczyzny, w której będzie rysowany rozkład pola – w menu kontekstowym wybrać pozycję *Named Expression* a następnie w okienku dialogowym pozycję E_x , E_y , lub E_z . Opis wybranych rozkładów pojawiają się w gałęzi *NamedExpr* pod gałęzią *FieldOverlays* w drzewie projektu.

Dlaczego rozkład natężenia i rozkład wektorowy pola elektrycznego są symetryczne osiowo a rozkład składowych pola nie ma takiej symetrii?

4. Narysować skalarny i wektorowy rozkład pola E i H wzdłuż linii w jej środku (płaszczyzna $0yz$) dla częstotliwości 3 GHz i 6 GHz. Oszacować długość fali i wpisać do formatki.

Rysowanie rozkładu i szacowanie długości fali wykonuje się korzystając z tych samych poleceń jak w podpunkcie 3 dla linii płaskorównoległej.



4.1, Rys. 5,
Rys. 6,
Rys. 7

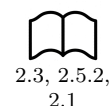
Jak zmieniła się długość fali ze zmianą częstotliwości? Czy uzyskane wyniki są zgodne z pracą domową? Od czego zależy długość fali dla rodzaju TEM (porównać uzyskane wartości z tabelką dla linii płasko-równoległej)? Oszacować, jak ta długość zmieni się po zmianie materiału na teflon (można przeprowadzić symulację w celu weryfikacji) i wpisać wartości do formatki.

4.2.2 Obliczenie parametrów obwodowych linii

1. Zdefiniować ścieżkę całkowania (patrz Rys. 3) dla obliczenia napięcia w płaszczyźnie pobudzenia linii (płaszczyzna $0xz$).

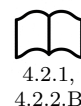
Przed rozpoczęciem rysowania ścieżek należy się upewnić, że aktywnym układem współrzędnych jest układ *Global* (gałąź *Cooridianate Systems* w okienku modelu), a następnie:

- (a) ustalić widok struktury tak, aby płaszczyzna $0xz$ była w płaszczyźnie ekranu
- (b) upewnić się, że wybór punktów jest ograniczony do płaszczyzny $0xz$
- (c) narysować dowolną linię (może być łamana) łączące obydwa przewody linii (zaczynając od przewodu zewnętrznego, czyli *A* zgodnie z Rys. 3)
- (d) nadawać łamanej nazwę, np. **droga1**
- (e) po narysowaniu odnaleźć opis tej linii w okienku model i upewnić się, że znajduje się ona w płaszczyźnie $0xz$ (tzn. współrzędna y każdego z punktów ścieżki ma wartość zerową)



2. Obliczyć napięcie wzdłuż narysowanej ścieżki całkowania dla częstotliwości 3 GHz korzystając z kalkulatora pól a wyznaczoną wartość wpisać do formatki.

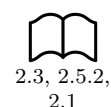
Czy wyznaczona wartość będzie zależać od długości i kształtu ścieżki? Czy można napięcie oszacować – jak w przypadku linii płasko-równoległej – na podstawie średniej wartości z rozkładu pola?



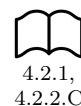
3. Zdefiniować zamkniętą drogę całkowania (otaczające wewnętrzny przewód, patrz Rys. 3) dla obliczenia prądu w płaszczyźnie pobudzenia linii (płaszczyzna $0xz$).

Podobnie jak w przypadku rysowania drogi całkowania dla obliczenia napięcia, przed rozpoczęciem rysowania należy się upewnić, że aktywnym układem współrzędnych jest układ *Global* (gałąź *Cooridianate Systems* w okienku modelu), a następnie:

- (a) ustalić widok struktury tak, aby płaszczyzna $0xz$ była w płaszczyźnie ekranu
- (b) upewnić się, że wybór punktów jest ograniczony do płaszczyzny $0xz$
- (c) narysować drogę zamkniętą (będzie to wielokąt) otaczającą (bez przecinania) przewód wewnętrzny linii (przewód *B* zgodnie z Rys. (2)), zwracając uwagę, aby rysując linię poruszać się zgodnie z ruchem wskazówek zegara
- (d) nadawć drodze zamkniętej nazwę, np. **petla1**
- (e) po narysowaniu odnaleźć opis narysowanej drogi w okienku model i upewnić się, że znajduje się ona w płaszczyźnie $0xz$ (tzn. współrzędna y każdego z punktów drogi ma wartość zerową)



4. Obliczyć prąd wzdłuż tej drogi zamkniętej dla częstotliwości 3 GHz korzystając z kalkulatora pól a wyznaczoną wartości wpisać do formatki.



5. Na podstawie wyznaczonego napięcia i prądu obliczyć impedancję charakterystyczną linii.

Czy wyznaczona wartość jest zgodna z pracą domową? Jak ta wartość zmieniłaby się przy zmianie materiału wypełniającego linię na teflon? Od czego zależy impedancja charakterystyczna dla rodzaju TEM?