

Sprawozdanie POFA lab 2

Symulacja propagacji fali w przewodnicach TEM

31.03.2025

Jakub Prusiński

3. Praca domowa

Przypisane wymiary (w milimetrach):

- linia płasko równoległa: $w = 7$, $h = 1$;
- linia współosiowa $a = 7$, $b = 1$.

1. Obliczanie impedancji charakterystycznej dla analizowanych linii przy zadanych wymiarach (zakładając, że ośrodkiem jest próżnia).

Dla linii płasko-równoległej:

Próżnia	Teflon
$Z_0 = \frac{h}{w} Z_w = \frac{120\pi}{7} \Omega \approx 53,856 \Omega$	$Z_0 = \frac{h}{w} Z_w = \frac{h}{w} \frac{Z}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{120\pi}{7\sqrt{2,1}} \Omega \approx 37,164 \Omega$

Dla linii współosiowej:

Próżnia	Teflon
$Z_0 = Z_w \frac{1}{2\pi} \ln \frac{a}{b} = \frac{120\pi}{2\pi} \ln \frac{7}{1} \approx 116,75 \Omega$	$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{2,1}} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{7}{1} \approx 80,57 \Omega$

2. Obliczanie długości fali we wszystkich przewodnicach dla powietrza i teflonu (przyjąć $\epsilon_r = 2.1$) oraz częstotliwości 3 GHz i 6 GHz.

Wyprowadzenie wzoru na długość fali w linii TEM (nie zależy od rodzaju przewodnicy):

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{2\pi \cdot c}{2\pi f \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}}$$

	Próżnia	Teflon
$f = 3 \text{ GHz}$	$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9} = 0,1 \text{ m} = 100 \text{ mm}$	$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9 \sqrt{2,1}} \approx 0,069 \text{ m} = 69 \text{ mm}$
$f = 6 \text{ GHz}$	$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^9} = 0,05 \text{ m} = 50 \text{ mm}$	$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^9 \sqrt{2,1}} \approx 0,0345 \text{ m} = 34,5 \text{ mm}$

4. Laboratorium

4.1 Linia płasko-równoległa

W tej części symulowany będzie odcinek linii płasko-równoległej o wymiarach przyjętych w pracy domowej.

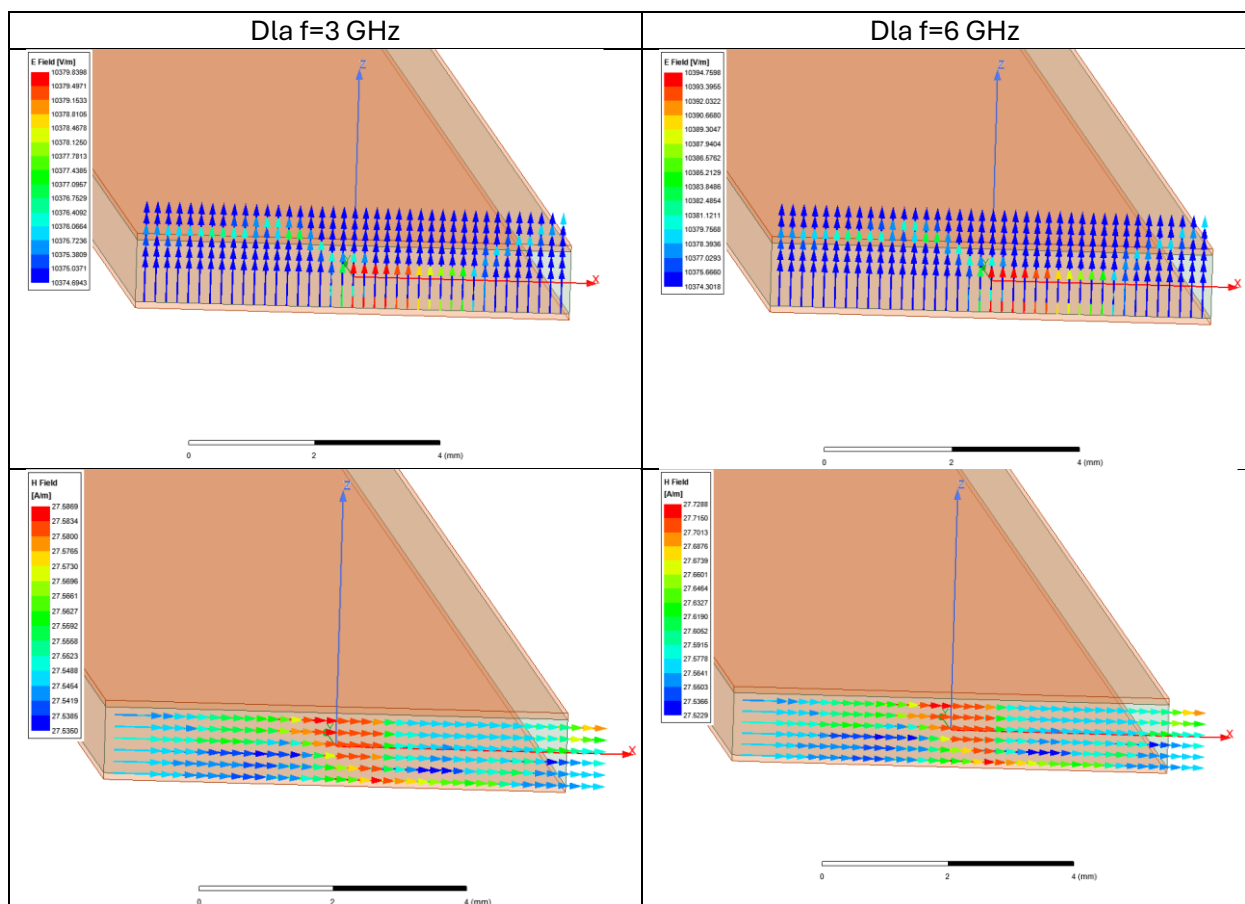
4.1.1 Obserwacja rozkładów wielkości polowych

1. Narysować skalarny rozkład natężenia pola E i H w płaszczyźnie pobudzenia (płaszczyzna 0xz) dla częstotliwości 3 GHz i 6 GHz. Oszacować średnie wartości natężenia obydwu pól i wpisać do formatki.

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

Rozkład pola bardzo nieznacznie zależy od częstotliwości. Oszacowane wartości E mają dokładność do liczb całkowitych, a wartości H do drugiej liczby po przecinku.

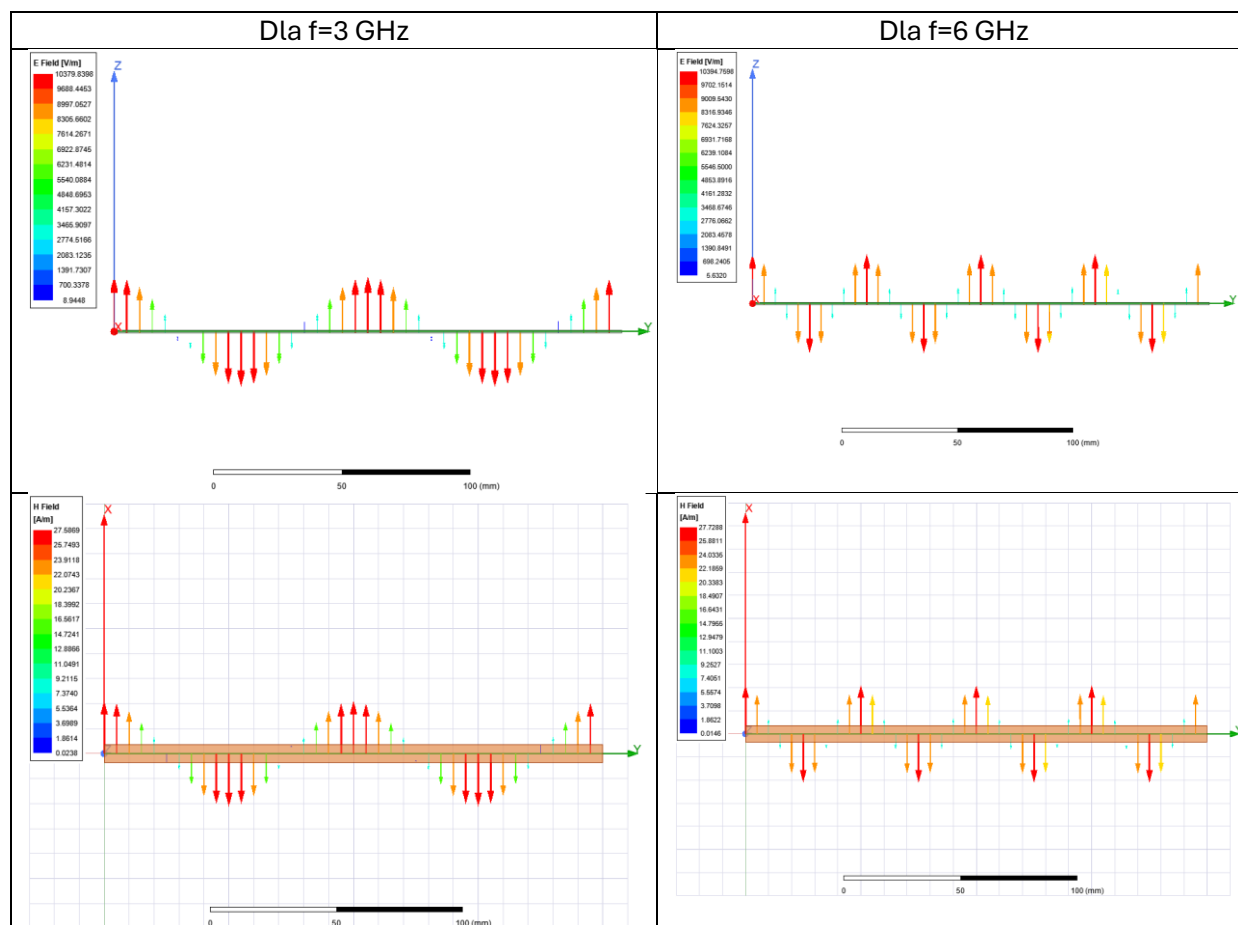
2. Narysować wektorowy rozkład natężenia pola E i H w płaszczyźnie pobudzenia (płaszczyzna 0xz) dla częstotliwości 3 GHz i 6 GHz.



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

Składowe X i Y pola E są zerowe. Składowe Y i Z pola H są zerowe.

3. Narysować skalarny i wektorowy rozkład natężenia pola E i H wzdłuż linii (płaszczyzna 0yz) dla częstotliwości 3 GHz i 6 GHz. Wkleić do sprawozdania rysunki dla rozkładów wektorowych. Oszacować długość fali i wpisać do formatki.



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 prowadnicę?

Długość fali maleje dwukrotnie z dwukrotnym wzrostem częstotliwości. Wyniki są zgodne z pracą domową. Fala rozchodzi się w kierunku $+Y$. Rozkład po upływie $T/4$ przesunąłby się o ćwierć długości fali w kierunku propagacji.

4. Narysować wektorowy rozkład części rzeczywistej zespolonego wektora Poyntinga w płaszczyźnie pobudzenia linii (płaszczyzna 0xz). Oszacować średnią wartość długości części rzeczywistej tego wektora i wpisać do formatki.

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?

Zwrot wektora Poyntinga jest taki sam jak kierunek propagacji fali (Y). Wektor Poyntinga jest prostopadły do wektorów natężenia pól E i H. Średnią wartość wektora Poyntinga można oszacować na podstawie wyznaczonych wcześniej średnich wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zgodnie ze wzorem:

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

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

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?

Fala rozchodzi się w kierunku +Y. Podczas jednego okresu sygnału pobudzającego fala pokonuje drogę równą swojej długości fali w przewodnicy.

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

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?

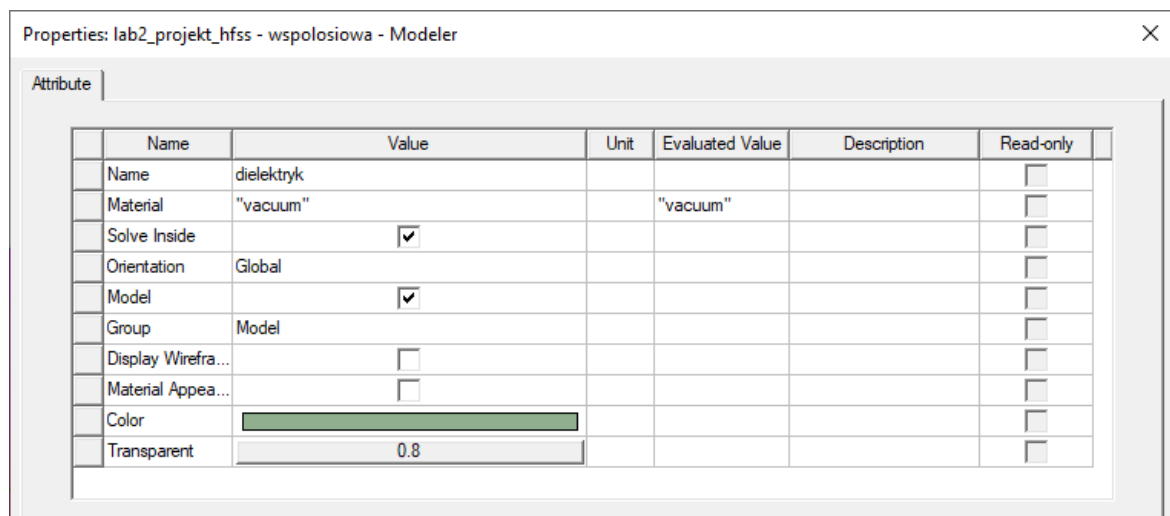
Prądy powierzchniowe w obu przewodach mają taką samą wartość, lecz przeciwne zwroty. Zgodnie z warunkami brzegowymi, linie prądu zamykają się całkowicie w obrębie struktury przewodzącej. Wektor gęstości prądu powierzchniowego jest styczny do powierzchni przewodnika i prostopadły do składowej normalnej pola magnetycznego.

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.

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?

Długość fali po zmianie dielektryka na teflon maleje $\frac{10}{7}$ -krotnie, co jest dobrym przybliżeniem pierwiastka z względnej przenikalności elektrycznej teflonu (2,1). Dzięki temu wyniki są niemal zgodne z obliczeniami zawartymi w pracy domowej. Po zmianie dielektryka na teflon pole elektryczne E maleje, pole magnetyczne H rośnie, a gęstość mocy pozostaje prawie niezmienną. Zmiany te są zgodne z teorią falowodów.

8. Przywrócono materiał wypełniający linię na próżnię i powtórzono 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 Oxz).

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?

Zgodnie z instrukcją, wyznaczone wartości nie zależą od drogi całkowania, a co za tym idzie, od jej długości i kształtu. Wynika to z bezwzględności rozkładu pola elektrycznego..

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?

Uzyskana w ten sposób wartość różni się nieznacznie od wartości wyznaczonych z całkowania. Ewentualne różnice mogą wynikać z przybliżeń stosowanych przez program podczas obliczania całki.

4. Zdefiniować dwie różne zamknięte drogi całkowania (otaczające dolny przewodnik) dla obliczenia prądu w płaszczyźnie pobudzenia linii (płaszczyzna Oxz).

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?

Nie, ponieważ wartość prądu nie zależy od drogi całkowania. Wynika to z bezwzględności pola magnetycznego w przypadku fali typu TEM w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji.

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?

Wartość ta jest bardzo zbliżona. Niewielka różnica może wynikać z zaokrągleń w obliczeniach.

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)?

W przypadku rozwarcia prąd na końcu linii wynosi zero, a napięcie osiąga wartość maksymalną ze względu na całkowite odbicie fali. W efekcie stosunek napięcia do prądu dąży do nieskończoności.

W przypadku zwarcia napięcie na końcu linii spada do zera, podczas gdy prąd osiąga wartość maksymalną. W tej sytuacji stosunek napięcia do prądu wynosi zero.

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

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.

Różnice są nieznaczne i wynikają z niedokładności symulacji oraz zaokrągleń w obliczeniach.

4.2 Linia współosiowa

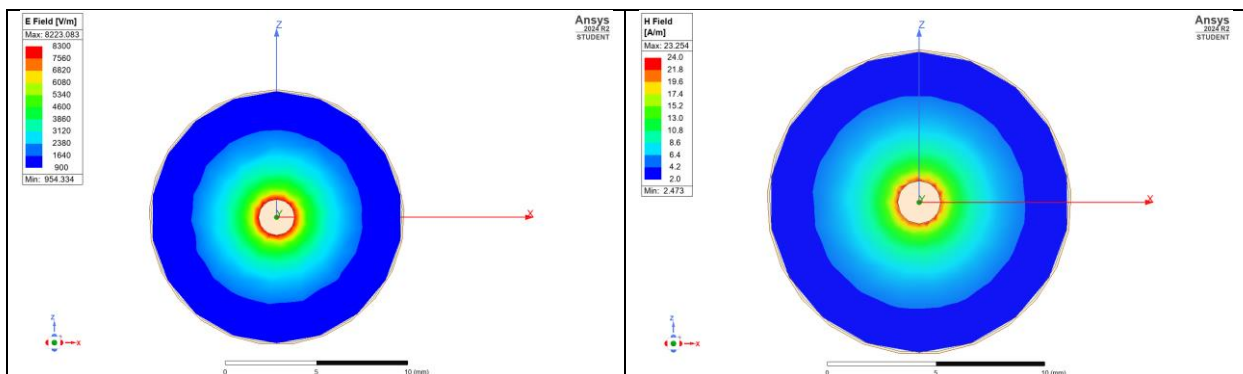
W tej części symulowany będzie odcinek linii współosiowej o wymiarach przyjętych w pracy domowej.

4.2.1 Obserwacja rozkładów wielkości polowych

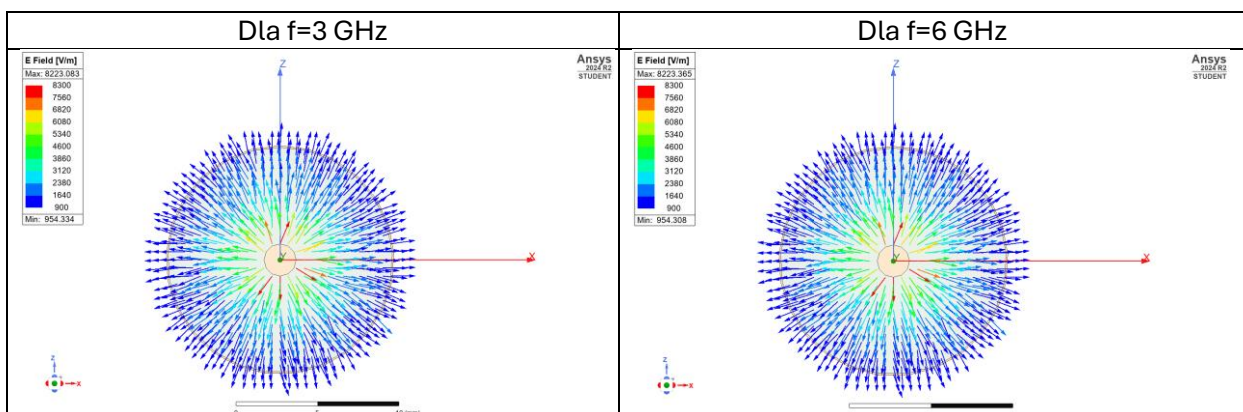
1. Narysować skalarny rozkład natężenia pola E i H w płaszczyźnie pobudzenia (płaszczyzna 0xz) dla częstotliwości 3 GHz i 6 GHz.

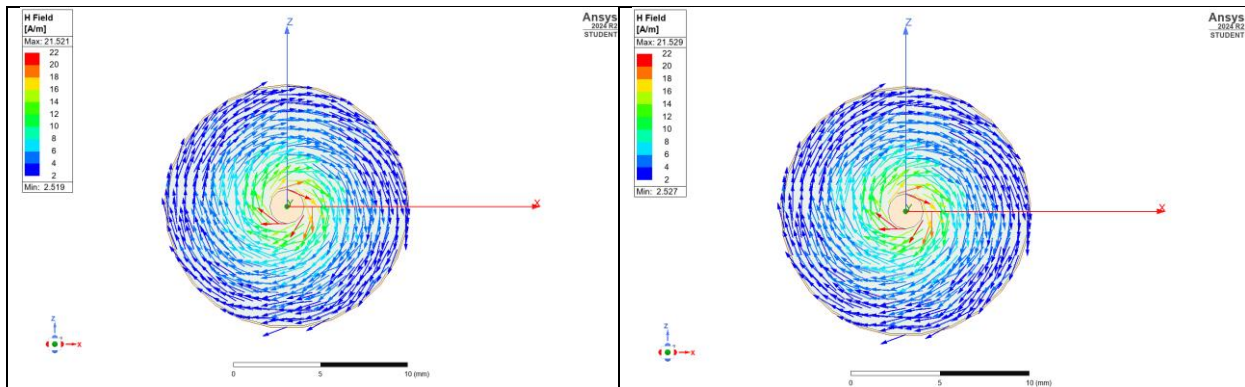
Uzasadnić zaobserwowaną zmienność natężenia pola w przekroju linii. Czy rozkład pola zależy od częstotliwości?

Zmienność natężenia pola w przekroju linii wynika głównie z rozkładu ładunku na przewodnikach oraz geometrii układu, co prowadzi do stopniowego spadku wartości pola w miarę oddalania się od centralnej elektrody. Rozkład pola nie zależy od częstotliwości.



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

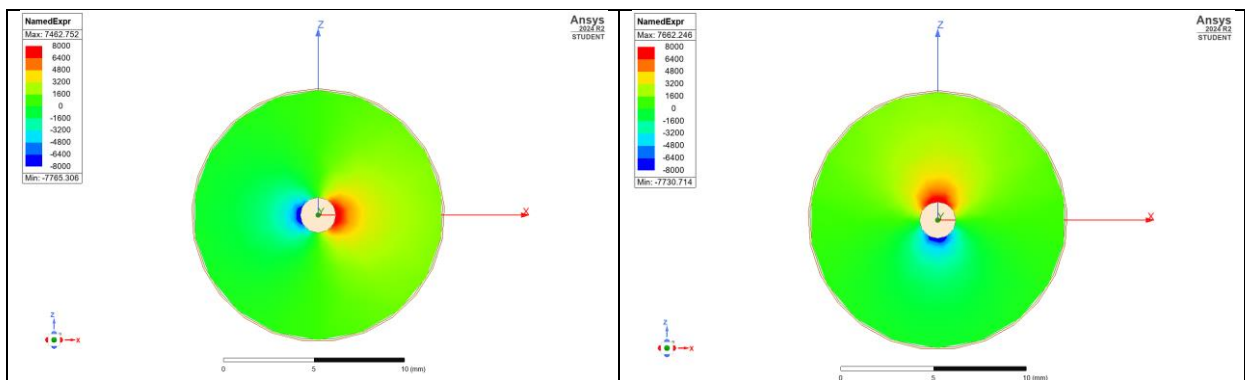




Które składowe obydwu pól są zerowe?

Składowe E_y oraz H_y są zerowe.

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



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

Symetryczny osiowo rozkład natężenia pola elektrycznego wynika z współosiowej geometrii linii oraz dominującego trybu TEM, w którym pole elektryczne jest zawsze skierowane promieniście od przewodnika wewnętrznego do zewnętrznego.

Z kolei, składowe pola zależą od wybranego układu współrzędnych. Na przykład, składowa E_x zmienia znak przy obrocie o 180° wokół osi symetrii, co łamię symetrię osiową dla tej konkretnej składowej, mimo że całe pole jest symetryczne.

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

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.

Długość fali maleje dwukrotnie wraz ze zmianą częstotliwości z 3 GHz na 6 GHz. Uzyskane wyniki (odpowiednio 100 i 50 mm) są zgodne z pracą domową. Długość fali dla rodzaju TEM wyraża się wzorem:

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_r}}$$

Zatem zależy ona jedynie od częstotliwości oraz ośrodka w którym się rozchodzi. Jak łatwo zauważyć długość fali nie zależy od rodzaju przewodnicy, stąd identyczne wartości jak w tabelce dla linii płasko-równoległej. Po zmianie materiału na teflon długość fali zmieni się zgodnie z powyższym wzorem, czyli będzie $\sqrt{\varepsilon_r}$ -krotnie mniejsza, gdzie ε_r to względna przenikalność elektryczna teflonu (2,1).