

Wpływ wymiarów otworu w obudowie ekranującej pole elektromagnetyczne na jej częstotliwość rezonansową - symulacja komputerowa

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki symulacyjnych badań numerycznych wpływu wymiarów otworu w metalowej obudowie ekranującej pole EM na jej częstotliwość rezonansową. Symulacje numeryczne wykonano w środowisku CST Studio z użyciem Frequency Domain Solver. Wyznaczono numerycznie częstotliwości rezonansowe różnych przypadków wymiarów prostokątnego otworu znajdującego się na środku ściany frontowej obudowy. Symulację wykonano dla: zmiany szerokości otworu przy zachowaniu jego stałej wysokości, zmiany wysokości otworu przy stałej jego szerokości i dla kilku wariantów szerokość-wysokość otworu przy zachowaniu takiej samej powierzchni. Z symulacji generalnie wynika, że istnienie otworu powoduje zmniejszenie częstotliwości rezonansowej obudowy. Przy ustalonym drugim wymiarze otworu, zwiększanie szerokości lub wysokości otworu skutkuje zmniejszeniem częstotliwości rezonansowej obudowy. Po raz pierwszy pokazano, że obecność otworu w obudowie zmienia morfologię modu rezonansowego obudowy.

Abstract. The article presents the results of simulated numerical investigations on the impact of the dimensions of an aperture in a shielding enclosure on its resonant frequency in an electromagnetic field. The numerical simulations were conducted using the CST Studio with the Frequency Domain Solver. Resonant frequencies of various cases of rectangular aperture dimensions located in the center of the front wall of the enclosure were numerically determined. The simulation was carried out for: varying the width of the aperture while keeping its height constant, varying the height of the aperture while keeping its width constant, and for several width-height combinations while maintaining the same area. Overall, the simulations indicate that the presence of an aperture leads to a decrease in the resonant frequency of the enclosure. With a fixed second dimension of the aperture, increasing the width or height of the aperture results in a decrease in the resonant frequency of the enclosure. It was shown for the first time that an aperture in the EM shielding changes the morphology of its resonant mode. (**Influence of the dimensions of an rectangular aperture in an EM shielding enclosure on its resonant frequency - numerical simulation**)

Słowa kluczowe: EMC, obudowa ekranująca, częstotliwość rezonansowa obudowy ekranującej, Eigenmode Solver, CST Studio.

Keywords: EMC, EM shielding enclosure, resonant frequency of the EM shielding enclosure, Eigenmode Solver, CST Studio.

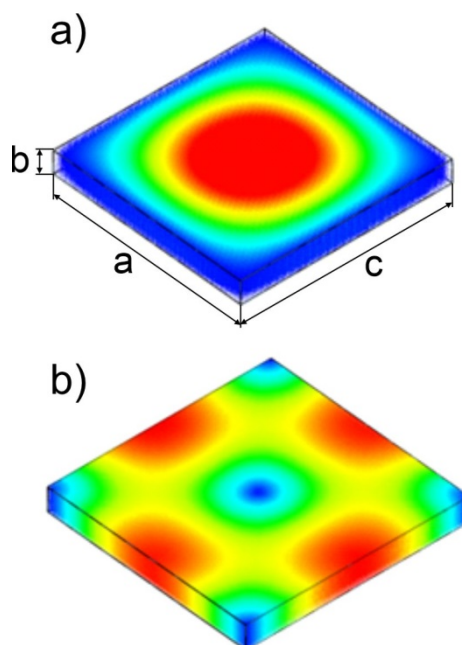
Wstęp

Wraz z postępowaniem technologicznym i rosnącą liczbą urządzeń elektronicznych dużym wyzwaniem, w kontekście kompatybilności elektromagnetycznej, stało się ekranowanie elektromagnetyczne (EM) układów i urządzeń elektronicznych. Ekranowanie EM realizowane jest w dwojaki sposób: jako ochrona obiektów przed skutkami zewnętrznego promieniowania EM oraz jako sposób ograniczenia emisji EM z wnętrza obiektów na zewnątrz.

W ostatnich latach dużą popularnością cieszą się małe metalowe obudowy ekranujące, których zadaniem jest ochrona układów i urządzeń elektronicznych znajdujących się w ich wnętrzu. Perfekcyjną ochronę obudów ekranujących burzą otwory technologiczne zapewniające odpowiednią wentylację, komunikację wewnątrz obudowy - zewnątrz i zasilanie energetyczne. Istnienie otworów technologicznych powoduje wnikanie promieniowania EM do wnętrza obudowy ekranującej i zakłócenie pracy lub uszkodzenie układów i urządzeń znajdujących się w jej wnętrzu. Podobnie, otwory technologiczne umożliwiają emisję promieniowania EM na zewnątrz obudowy

Mała metalowa obudowa ekranująca jest pewnego rodzaju elektromagnetycznym rezonatorem wnękowym z otworem, w którym po wprowadzeniu do niego promieniowania EM mogą zostać wzbudzone oscylacje na częstotliwościach rezonansowych [1], nazywane modami. Modom tym odpowiadają pola EM o określonej geometrii przestrzennej i częstotliwości. Rozkłady przestrzenne pól elektrycznych i magnetycznych poszczególnych modów (zwane morfologiami) są różne i charakterystyczne dla danego modu. Zgodnie z teorią [1], w obudowie, która jest rezonatorem, występują dwojakiemu rodzaju drgania własne: mody poprzeczne TE i TM. W przypadku tzw. modów poprzecznych TE_{mnp} składowa wzdłużna pola elektrycznego $E_z = 0$, natomiast dla tzw. modów poprzecznych TM_{mnp} składowa wzdłużna pola magnetycznego $H_z = 0$. Wskaźniki m, n, p (gdzie $m=1,2,3,\dots$;

$n=1,2,3,\dots$; $p=0,1,2,3,\dots$) oznaczają ilość połówek fal odkładających się wzdłuż poszczególnych ścian rezonatora. W idealnym przypadku, gdy nie ma strat w metalowych ścianach rezonatora, stabilne mody mogą być wzbudzone tylko na ściśle określonych częstotliwościach f_{mnp} . Dla rezonatora prostokątnego o długości ścian oznaczonych jako a, b, c , gdzie $b < a < c$ (rys. 1), modem podstawowym jest mod TE_{101} o najmniejszej częstotliwości [2]. Rozkład pola EM dla modu podstawowego TE_{101} w rezonatorze prostokątnym bez otworów technologicznych przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Morfologia modu podstawowego TE_{101} w rezonatorze bez otworów technologicznych. a) rozkład natężenia pola elektrycznego, b) rozkład natężenia pola magnetycznego

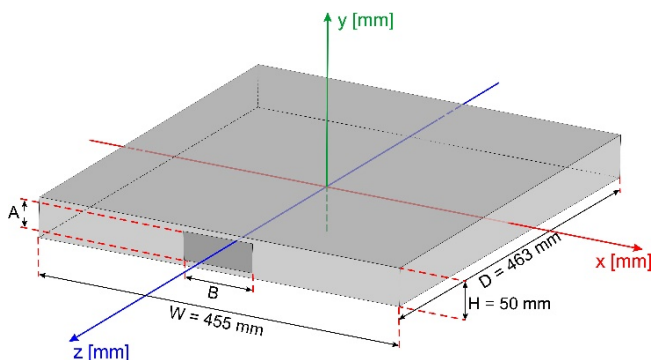
W niniejszej pracy przedstawiamy wyniki numerycznych badań symulacyjnych wpływu wymiarów otworu w małej metalowej obudowie na morfologię i częstotliwość modu podstawowego TE₁₀₁. Pomocne w tym względzie będą symulacyjnie wyznaczone krzywe rezonansowe badanej obudowy elektromagnetycznej, przedstawiające zależność gęstości widmowej natężenia pola elektrycznego modu TE₁₀₁ w środku obudowy od częstotliwości. Wyznaczone krzywe rezonansowe dostarczają informacji o maksymalnej gęstości modu TE₁₀₁, częstotliwości rezonansowej modu TE₁₀₁ oraz szerokości połówkowej krzywej rezonansowej, określającą tzw. dobroć obudowy jako rezonatora.

Obudowa z otworem

Schemat badanej obudowy z otworem przedstawiono na rysunku 2. Badana obudowa została umieszczona w prostokątnym układzie współrzędnych w taki sposób, że punkt (0,0,0) znajduje się w jej geometrycznym środku. Wymiary zewnętrzne obudowy wynoszą: szerokość: 455 mm x wysokość: 50 mm x głębokość: 463 mm. Na środku przedniej ściany obudowy umieszczono otwór. Symulacje wykonano dla siedemnastu wymiarów otworu, którego wymiary zaznaczono na rys. 1 literami A (wysokość) i B (szerokość). Wymiary otworu dla różnych przypadków oznaczonych 1-18 podzielono na trzy grupy a, b, c. Przedstawiono je razem z odpowiadającymi im częstotliwościami rezonansowymi modu w tab. 1.

Tabela 1. Wymiary otworu dla trzech grup a, b i c badanych przypadków.

Grupa	Wysokość A [mm]	Szerokość B [mm]	Częstotliwość [GHz]
a	40	40	0,4620
		50	0,4614
		60	0,4610
		80	0,4595
		120	0,4534
		160	0,4452
b	80	240	0,4239
		10	0,4614
		15	0,4610
		20	0,4605
		30	0,4604
		40	0,4595
c	50	48	0,4590
		48	0,4613
		40	0,4610
		30	0,4604
		20	0,4555
		15	0,4499
		10	0,4324



Rys. 2. Schemat badanej obudowy komputerowej z otworem, umieszczonej w prostokątnym układzie współrzędnych. Początek układu współrzędnych znajduje się w geometrycznym środku obudowy.

Metoda symulacyjna

W badaniach symulacyjnych zastosowano program CST Studio wyposażony w moduł Microwaves&RF&Optical do modelowania i kompleksowych symulacji elektromagnetycznych obiektów 3D [3].

Symulacja obejmowała wykonanie obliczeń numerycznych za pomocą Frequency Domain Solver umożliwiającego wyznaczenie morfologii modu i odpowiadającej mu częstotliwości rezonansowej badanej obudowy.

W ramach symulacji otrzymano morfologię i widmową gęstość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego modu podstawowego TE₁₀₁.

Wyniki

Najpierw wyznaczono analitycznie częstotliwość modu podstawowego rezonatora bez otworu i porównano ją z częstotliwością wyznaczoną w programie CST Studio. Następnie wykonano symulacje dla trzech grup parametrów otworów, w których zmieniano: szerokość otworu przy zachowaniu jego stałej wysokości (grupa a), wysokość otworu przy stałej jego szerokości (grupa b) oraz szerokość i wysokość otworu w taki sposób, aby zachować taką samą powierzchnię otworu (grupa c).

W grupie a dokonywano zmiany szerokości (wymiar B) przy stałej wysokości wynoszącej A = 40 mm. W grupie b zmieniano wysokość przy stałej wartości szerokości wynoszącej B = 80 mm, natomiast grupę c stanowią przypadki o stałej powierzchni otworu wynoszącej 2400 mm² dla różnych kombinacji szerokości i wysokości.

Częstotliwość rezonansową badanej obudowy bez otworu wyznaczono ze wzoru [4]:

$$(1) f_{mnp} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}$$

Dla modu podstawowego TE₁₀₁ wynosi ona f = 0,4622 GHz.

Wyliczone w programie CST Studio wartości częstotliwości rezonansowej dla modu podstawowego TE₁₀₁ rezonatora bez otworu wynosi 0,4619 GHz.

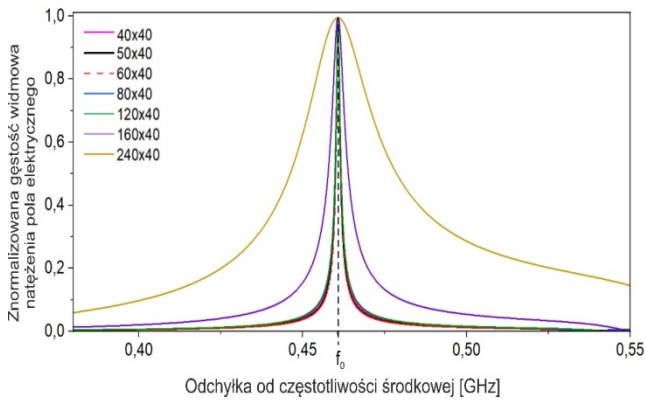
Rysunki 3 – 5 oraz tabele 1 i 2 przedstawiają wyniki symulacji dla trzech grup parametrycznych a, b i c zmian wymiarów otworu.

Generalnie, w przypadku pojawienia się otworu na przedniej ścianie obudowy częstotliwość rezonansowa przesuwa się w stronę niższych częstotliwości. Zależność tę widać we wszystkich badanych przypadkach.

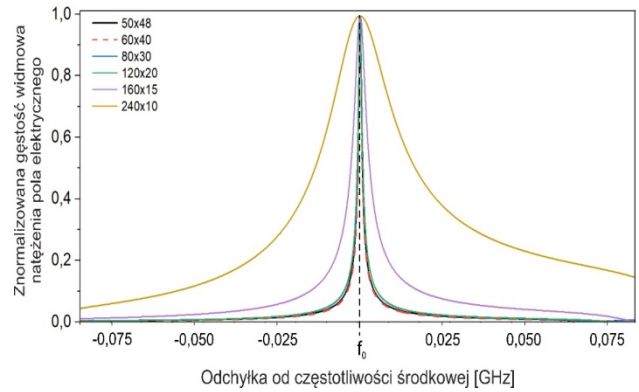
Dla stałej wysokości A = 40 mm (rys. 3) można zauważyć, że ze wzrostem szerokości otworu częstotliwość rezonansowa przesuwa się w stronę niższych częstotliwości.

W przypadku symulacji dla stałej szerokości B = 80 mm (rys. 4) wzrost wysokości otworu powoduje również przesunięcie się częstotliwości rezonansowej w stronę częstotliwości niższych.

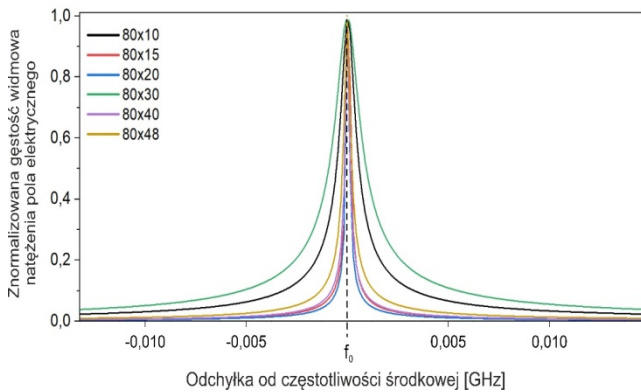
W grupie otworów o stałej powierzchni otworu 2400 mm², ale różnych jego szerokościach i wysokościach (rys. 5) częstotliwość rezonansowa modu TE₁₀₁ maleje przy zwiększaniu szerokości otworu i jednoczesnym zmniejszaniu jego wysokości.



Rys. 3. Zależność znormalizowanej gęstości widmowej natężenia pola elektrycznego w funkcji odchyłki od częstotliwości środkowej dla różnych wymiarów szerokości otworu (od 40 mm do 2440 mm) przy ustalonej wysokości otworu (40 mm).



Rys. 5. Zależność znormalizowanej gęstości widmowej natężenia pola elektrycznego w funkcji odchyłki od częstotliwości środkowej dla różnych wymiarów otworu o powierzchni 2400 cm².



Rys. 4. Zależność znormalizowanej gęstości widmowej natężenia pola elektrycznego w funkcji odchyłki od częstotliwości środkowej dla różnych wymiarów wysokości otworu (od 10 mm do 48 mm) przy ustalonej szerokości otworu (80 mm).

Na rys. 6, zależności znormalizowanej gęstości widmowej natężenia pola elektrycznego modu TE₁₀₁ od częstotliwości. Z rys. 6 wynika, że ze wzrostem szerokości otworu szerokość krzywych rezonansowych rośnie. W przypadku zmian wysokości otworu nie zauważono korelacji z szerokością krzywych rezonansowych. Natomiast z rys. 5 wynika, że przy stałej powierzchni otworu za zwiększanie się szerokości krzywych rezonansowych odpowiada zwiększanie szerokości otworu.

Wykonana symulacja wykazała po raz pierwszy, że otwór w elektromagnetycznej obudowie ekranującej zmienia morfologię modu rezonansowego TE₁₀₁. Przykłady takiej zmiany pokazane są w tabeli 2. Wynik ten jest nowością i wymaga dalszej analizy.

Tabela 2. Morfologie modu podstawowego TE₁₀₁ dla trzech wybranych wymiarów otworu. Zachowana jest powierzchnia otworu.

Wymiary otworu	240 mm x 10 mm	120 mm x 20 mm	60 mm x 40 mm
Pole elektryczne			
Pole magnetyczne			

Podsumowanie

Badania numeryczne wpływu wymiarów otworu w małej metalowej obudowie na częstotliwość modu podstawowego TE_{101} wykazały, że obecność otworu w rezonatorze powoduje przesunięcie częstotliwości rezonansowej w stronę niższych częstotliwości.

Ze wzrostem szerokości otworu, przy stałej jego wysokości, częstotliwość rezonansowa przesuwa się w stronę niższych częstotliwości oraz szerokość krzywych rezonansowych wzrasta.

Dla stałej wartości szerokości otworu wzrost wysokości otworu powoduje przesunięcie się częstotliwości rezonansowej także w stronę niższych częstotliwości.

W grupie otworów o tej samej powierzchni, ale różnych wartościach szerokości i wysokości, zaobserwowano, że ze wzrostem powierzchni otworu następuje przesuwanie się częstotliwości rezonansowej w stronę niższych częstotliwości i jednocześnie zwiększanie się szerokości krzywych rezonansowych.

Wykonane badania symulacyjne wykazały po raz pierwszy, że otwór w obudowie ekranującej nie tylko zmniejsza częstotliwość rezonansową modu TE_{101} , ale

zmienia też jego morfologię. Jest to wynik „wycieku” promieniowania EM przez otwór na zewnątrz obudowy

Obecnie podejmujemy próby wyjaśnienia ewentualnej roli jaką odgrywa zmiana morfologii modu TE_{101} na jego częstotliwość rezonansową.

Autorzy: mgr inż. Magdalena Budnarowska, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: m.budnarowska@we.umg.edu.pl;

prof. dr hab. inż. Jerzy Mizeraczyk, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: j.mizeraczyk@we.umg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Pozar D. M., Microwave engineering, *John wiley & sons, Inc.*, 3rd ed., 278, 2005
- [2] Hao C., Li D., Simplified model of shielding effectiveness of a cavity with apertures on different sides, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56, 2, 335–342, 2014
- [3] www.cst.com (dostęp: 18.04.2023)
- [4] Dobrowolski J. A., Technika wielkich częstotliwości, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, 182, 2001