

Symulacyjne i eksperymentalne badania właściwości elektromagnetycznych planarnej macierzy metamateriałowej w zakresie mikrofalowym

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznej oddziaływania mikrofalowego promieniowania elektromagnetycznego (EM) z planarną macierzą metamateriałową (MM) złożoną z autorskich pojedynczych komórek metamateriałowych i porównano je z wynikami eksperymentalnymi. Struktura planarnej macierzy metamateriałowej została zaprojektowana pod kątem zastosowania jej jako wysoko absorbującego harwestera energii EM w paśmie 2-3 GHz. Do symulacji numerycznej zastosowano środowisko CST Studio umożliwiające rozwiązywanie zagadnień elektromagnetycznych w szerokim zakresie częstotliwości. Wyznaczono numerycznie współczynniki odbicia, absorpcji i transmisji promieniowania mikrofalowego przez zaprojektowaną macierz w warunkach falowodowych. Wyniki numeryczne wykazały, że absorpcja promieniowania mikrofalowego przez macierz metamateriałową ma charakter rezonansowy. Największy współczynnik absorpcji (około 96%) występuje dla częstotliwości około 2,6 GHz. Zgodnie z projektem zbudowano rzeczywistą macierz metamateriałową i przebadano jej właściwości elektromagnetyczne eksperymentalnie używając wektorowego analizatora sieci Keysight N5225 w układzie z falowodem. Otrzymane wyniki eksperymentalne porównano z wynikami symulacji numerycznej. Porównanie wykazało bardzo dobrą zgodność wyników symulacji i eksperymentu. Eksperymentalna pozytywna walidacja wyników symulacji świadczy o tym, że CST Studio jest wiarygodnym narzędziem do projektowania i analizy metamateriałowych absorberów promieniowania mikrofalowego. Zaprezentowana w tej pracy macierz MM zostanie w najbliższej przyszłości zastosowana do budowy większych absorberów.

Abstract. The article presents the results of a numerical simulation of the interaction of microwave electromagnetic radiation with a planar metamaterial matrix (MM) composed of original single cells of the metamaterial. The numerical simulation results are compared with experimental results. The planar metamaterial matrix structure was designed to be used as a highly absorbing EM energy collector in the 2-3 GHz band. The CST Studio environment was used for the numerical simulation, which enables the solving of electromagnetic problems in a wide frequency range. The reflection, absorption and transmission coefficients of microwave radiation through the designed matrix were determined numerically under waveguide conditions. The numerical results showed that the absorption of microwave radiation by the metamaterial matrix is resonant. The highest absorption coefficient (about 96%) occurs at about 2.6 GHz. According to the project, a real metamaterial matrix was built and its electromagnetic properties were examined experimentally using the Keysight N5225 vector network analyzer in the waveguide operating mode. The obtained experimental results were compared with the results of the numerical simulation. The comparison showed a very good agreement of the simulation and experiment results. They confirmed that the tested metamaterial matrix shows strong absorption properties and can be useful for building larger absorbers of microwave radiation. Experimental positive validation of simulation results proves that CST Studio is a reliable tool for the design and analysis of microwave absorbing metamaterials. The MM matrix presented in this article will be used in the near future to build larger absorbers. (*Simulation and experimental studies of the electromagnetic properties of a planar metamaterial array structure in the microwave range*)

Słowa kluczowe: metamateriałowe absorbery promieniowania elektromagnetycznego, harwestery elektromagnetyczne, metamateriały, oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z metamateriałowymi strukturami mikrofalowymi

Keywords: metamaterial absorbers of electromagnetic radiation, electromagnetic harvester, metamaterials, interaction of electromagnetic radiation with microwave metamaterial structures

Wstęp

Konwencjonalne absorbery promieniowania elektromagnetycznego (absorbery o kształcie ostrosłupów wykonane z różnych materiałów) są materiałami szeroko wykorzystywanymi w wielu dziedzinach nauki i praktyki. Ich praktyczne zastosowanie obejmuje m.in. filtry promieniowania elektromagnetycznego oraz struktury i rozwiązania technologiczne związane z maskowaniem obiektów i szeroko pojętą kompatybilnością elektromagnetyczną [1-4]. W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania alternatywnymi rozwiązaniami wykorzystującymi nowe materiały i struktury technologiczne o właściwościach absorpcyjnych. W ten trend wpisują się niewystępujące w przyrodzie metamateriały (MM).

Metamateriały są grupą materiałów o niestandardowych właściwościach elektromagnetycznych (EM). Badania właściwości MM pokazują, że MM mogą posłużyć do budowy nie tylko pojedynczych absorberów, ale też i złożonych struktur absorpcyjnych. Właściwości EM struktury MM zależą od jej wymiarów charakterystycznych (stosunku wymiaru struktury do długości fali, z którą oddziałują), kształtu poszczególnych elementów składowych, parametrów materiałowych oraz częstotliwości padającego promieniowania. Można wyróżnić trzy rodzaje oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego ze strukturą metamateriałową: rezonansowy, pasmowy (szerokopasmowy) oraz mieszany [5].

W niniejszej pracy przedstawiamy wyniki numerycznych badań symulacyjnych parametrów elektromagnetycznych autorskiej planarnej macierzy MM o wymiarze 2x3 (2 rzędy po 3 pojedyncze komórki, rys. 1) i właściwościach absorpcyjnych w paśmie 2-3 GHz. Otrzymane wyniki symulacyjne zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Badania wykonano pod kątem właściwości absorpcyjnych badanej struktury w zakresie mikrofalowym od 2 GHz do 3 GHz.

Struktura metamateriałowa

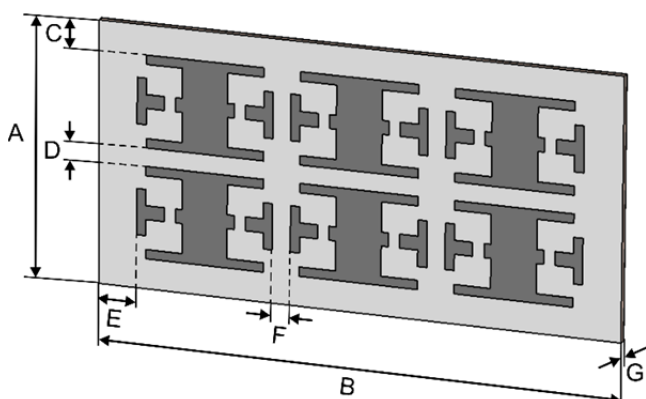
W pracy podjęto się eksperymentalnej walidacji wyników otrzymanych na drodze symulacji numerycznych obejmujących oddziaływanie promieniowania mikrofalowego z planarną macierzą MM o stosunkowo silnych właściwościach absorpcyjnych w paśmie częstotliwościowym 2-3 GHz. Taka macierz metamateriałowa może stanowić element składowy większego układu mikrofalowego o właściwościach absorpcyjnych.

Najczęściej spotykane struktury metamateriałowe o właściwościach absorpcyjnych składają się z cienkiej warstwy metalicznej o określonym kształcie (stanowiącej rezonator), umieszczonej na podłożu dielektrycznym oraz silnie przewodzącej cienkiej metalowej warstwie znajdującej się po przeciwnej stronie podłoża dielektrycznego. Zadaniem metalowej warstwy w typowej strukturze metamateriałowej jest całkowita eliminacja transmisji promieniowania przez tę strukturę. Badany w tej pracy

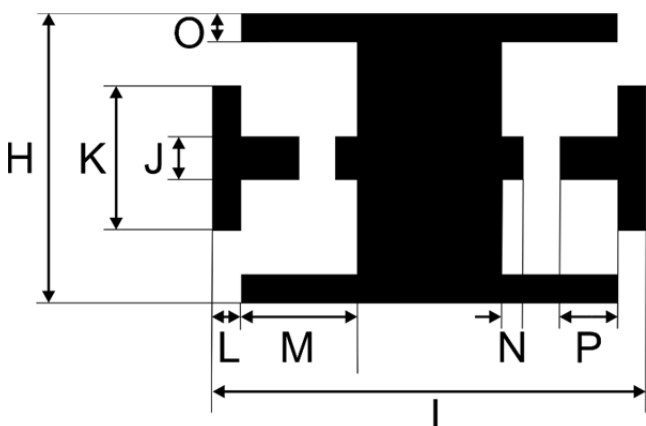
metamateriał jest zaprojektowaną autorską planarną strukturą składającą się z pojedynczych komórek metamateriałowych ułożonych w macierz o wymiarze 2x3.

Schematy geometryczne macierzy i pojedynczej struktury MM przedstawione są na rys. 1 i 2. Macierz stanowi sześć pojedynczych komórek metamateriałowych. Pojedynczą komórkę stanowi struktura utworzona z miedzianych ścieżek o grubości 35 μm , nałożonych na prostokątne podłoże dielektryczne FR-4. Za tylną ścianą podłoża znajduje się warstwa metaliczna o grubości 35 μm . Wymiary macierzy i pojedynczej komórki zestawione są w tabeli 1.

Właściwości elektromagnetyczne badanej macierzy MM zależą od właściwości materiałowych warstw metalicznych i podłoża dielektrycznego oraz od ich geometrii (wymiarów i konfiguracji). W związku z tym należy oczekiwać, że właściwości elektromagnetyczne badanej macierzy będą zależą od częstotliwości padającego na nią promieniowania elektromagnetycznego.



Rys.1. Schemat geometryczny planarnej macierzy metamateriałowej na podłożu dielektrycznym FR-4 (kolor jaśniejszy) składający się z 6 pojedynczych komórek MM (kolor ciemniejszy)



Rys.2. Schemat geometryczny pojedynczej planarnej komórki metamateriałowej

Tabela 1. Wymiary macierzy i pojedynczej struktury metamateriałowej

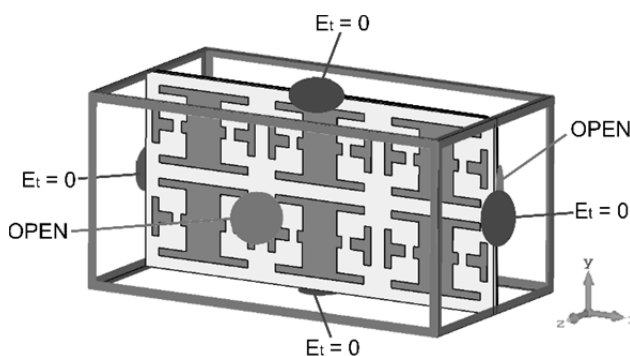
Oznaczenie	Wartość [mm]
A	54
B	109,5
C	6
D	4
E	8
F	4
G	1,5

H	19
I	28,5
J	3
K	9,5
L	2
M	7,5
N	1,5
O	2
P	4

Numeryczne badania symulacyjne właściwości EM macierzy metamateriałowej

W badaniach symulacyjnych użyty został program CST Studio wyposażony w moduł MW&RF&Optical do obliczeń wysokoczęstotliwościowych pól elektromagnetycznych [6].

Procedura symulacyjna polegała na umieszczeniu badanej macierzy metamateriałowej w wirtualnym torze propagacyjnym promieniowania EM. Szkic toru propagacyjnego i przyjęte w nim warunki brzegowe jak dla przypadku struktury MM w falowodzie przedstawiono na rys. 3.



Rys.3. Tor propagacyjny i warunki brzegowe. Kierunek propagacji promieniowania EM w kierunku - z.

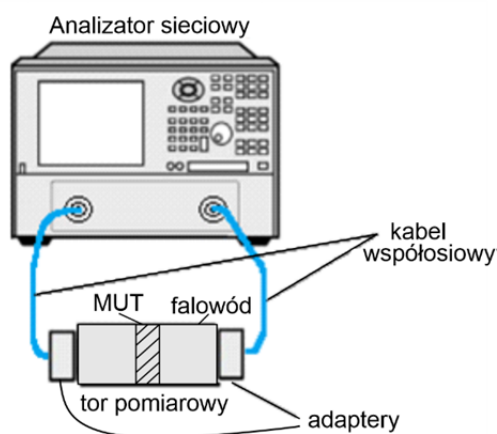
W ogólności promieniowanie EM padające na strukturę metamateriałową zostaje zaabsorbowane, odbite i transmitowane przez tę strukturę. W programie CST Studio, symulującym procesy absorpcji, odbicia i transmisji, zostają wyznaczone współczynniki tzw. macierzy rozproszenia S promieniowania padającego na badaną strukturę [7]. Znając wartości współczynników macierzy rozproszenia S_{11} , S_{12} , S_{21} oraz S_{22} można obliczyć wartości współczynników absorpcji A, odbicia R i transmisji T promieniowania padającego na badaną strukturę [8].

Eksperymentalne badania właściwości EM macierzy MM

Podobne badania właściwości EM (współczynników absorpcji, odbicia i transmisji) planarnej macierzy metamateriałowej można przeprowadzić eksperymentalnie techniką falowodową z użyciem wektorowego analizatora sieci.

Układ pomiarowy do pomiaru właściwości EM planarnej macierzy metamateriałowej (tzn. absorpcji, odbicia i transmisji) składa się z wektorowego analizatora sieci Keysight N5225 połączonego za pomocą kabli współosiowych i dedykowanych adapterów z torem pomiarowym (rys. 4). Tor pomiarowy tworzą dwa adaptery z falowodem WR-43, w którym umieszczona jest badana macierz metamateriałowa (MUT - Material Under Test).

Falowód w układzie pomiarowym został tak dobrany, aby możliwe było wykonanie pomiarów współczynników macierzy rozproszenia S oraz współczynników absorpcji, odbicia i transmisji badanej macierzy w przewidywanym paśmie absorpcyjnym, tj. zakresie częstotliwości od 2 do 3 GHz.

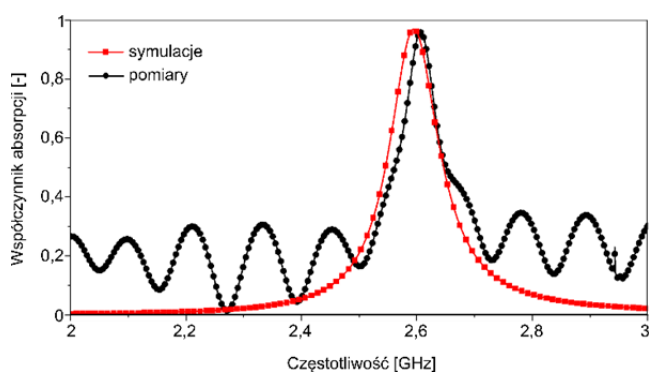


Rys.4. Układ pomiarowy do badania właściwości EM macierzy metamateriałowej

Wyniki badań

Wyniki wykonanych numerycznych badań symulacyjnych i badań eksperymentalnych zaprezentowane są na rys. 5.

Na rys. 5 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe współczynników absorpcji A macierzy metamateriałowej w zakresie częstotliwości od 2 GHz do 3 GHz.



Rys.5. Współczynniki absorpcji (A) promieniowania elektromagnetycznego badanej macierzy metamateriałowej w funkcji częstotliwości otrzymane z numerycznych badań symulacyjnych i badań eksperymentalnych

Oba badania wykazały, że w zakresie częstotliwości 2 – 3 GHz występuje jedno stosunkowo wąskie pasmo absorpcyjne o szerokości połówkowej około 0,08 GHz. Z symulacji numerycznych wynika, że maksimum absorpcji macierzy występuje przy częstotliwości 2,596 GHz. Badania eksperymentalne wykazały, że maksimum występuje przy częstotliwości 2,606 GHz. Dla powyższych częstotliwości rezonansowych współczynniki absorpcji promieniowania osiągnęły odpowiednio wartości: $A = 0,968$ i $A = 0,959$. A zatem otrzymano bardzo dobrą zgodność wyników symulacyjnych i pomiarowych.

Wnioski

Charakterystyki częstotliwościowe współczynnika absorpcji otrzymane w wyniku wykonanej symulacji numerycznej w środowisku CST Studio i przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazały, że badana macierz metamateriałowa charakteryzuje się silnymi właściwościami absorpcyjnymi promieniowania mikrofalowego w przedziale od 2 GHz do 3 GHz. Właściwości absorpcyjne macierzy metamateriałowej mają charakter rezonansowy.

Przeprowadzone badania umożliwiły wyznaczenie i potwierdzenie eksperymentalne liczbowych wartości współczynnika absorpcji dla planarnej macierzy metamateriałowej. Badania symulacyjne wykazały, że współczynnik absorpcji macierzy MM osiąga maksimum ($A = 96,8\%$) przy częstotliwości rezonansowej $f = 2,596$ GHz. Wyniki badań eksperymentalnych są zgodne. Współczynnik absorpcji osiąga wartość maksymalną $A = 95,9\%$ przy częstotliwości $f = 2,606$ GHz, pozytywnie walidując zastosowaną metodę symulacyjną.

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2022 nr projektu 006/RID/2018/19 kwota finansowania 11 870 000 zł.

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] Chakraborty A., Recent developments and analysis of electromagnetic metamaterial with all of its application in terahertz range, *IOSR J. Electron. Commun. Eng.*, 2013, vol. 6, pp. 86-93
- [2] Panwar R., Lee J. R., Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review, *Aerospace Science and Technology*, 2017, vol. 66, pp. 216-234
- [3] Panwar R., Puthucheri S., Agarwala V., Singh D., Fractal frequency-selective surface embedded thin broadband microwave absorber coatings using heterogeneous composites, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, vol. 63(8), pp. 2438-2448
- [4] Singh G., Marwaha A., A review of metamaterials and its applications, *Int. J. Eng. Trends Technol.*, 2015, vol. 14, pp. 305-310
- [5] Watts C. M., Liu X., Padilla W. J., Metamaterial electromagnetic wave absorbers, *Advanced materials*, 2012, vol. 24(23), pp. 98-120
- [6] www.cst.com
- [7] Zhu W., Electromagnetic Metamaterial Absorbers: From Narrowband to Broadband, *BoD*, 2019, pp. 133-144
- [8] Landy N. I., Sajuyigbe S., Mock J. J., Smith D. R., Padilla W. J., Perfect metamaterial absorber. *Physical review letters*, 2018, 100(20), 207402