

Dobór struktury przewodzącego materiału periodycznego ze względu na zjawiska elektromagnetyczne

Streszczenie. W artykule rozpatrzono problem kształtowania właściwości materiału o strukturze periodycznej, złożonego z elementów o skali milimetrowej. Elementy tworzone z materiałów przewodzących są umieszczone na podłożu z elastycznego laminatu. Poddano dyskusji właściwości widmowe elementów, przy uwzględnieniu modelu polowego. Określono wpływ parametrów geometrycznych elementu konstrukcyjnego na wartości odwzorowania zakładanej charakterystyki widmowej. Dobór geometrii elementu zrealizowano z użyciem algorytmu inteligentnych rojów.

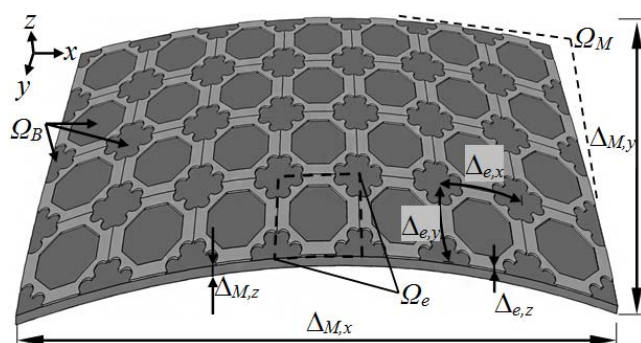
Abstract. The paper demonstrates the problem of adjustment of electromagnetic properties of layered material with two-dimensional periodic structure of millimeter-scale components. The conducting paths of the constructed elements are placed on a flexible based layer. The spectral properties of the structure are shaped by the subtle modification of the geometry of components. The relation between different configurations of the component and their electric properties is determined. The presented problem is solved using particle swarm optimization algorithm. (**Arrangement of structure of a conductive periodic material based on the analysis of electromagnetic phenomena using multi-criteria scheme.**)

Słowa kluczowe: algorytm roju cząstek, zjawiska elektromagnetyczne, struktury periodyczne, metoda elementów skończonych.

Keywords: particle swarm algorithm, electromagnetic phenomena, periodic structures, finite element method.

Wstęp

Szerokie wykorzystanie w układach elektrycznych i elektronicznych nowoczesnych materiałów, m.in. kompozytów [1, 2, 3] czy struktur fraktalnych [4], jest podstawą rozwoju technologii złożonych struktur warstwowych. Zastępcze parametry elektryczne, mechaniczne oraz termiczne są kształtowane w wyniku doboru geometrii elementów składowych, ich makroskopowej struktury oraz materiałów poszczególnych warstw. W ten sposób możliwe staje się dostosowanie efektywnych właściwości materiału do zadanych potrzeb w bardzo szerokim zakresie [5, 6]. Przykładem złożonych materiałów kompozytowych mogą być tzw. materiały laminarne z warstwą periodyczną. Powtarzalne rozmieszczenie na warstwie materiału bazowego Ω_B identycznych komórek Ω_e , prowadzi do uformowania układu Ω_M z przewodzącą warstwą roboczą (rys. 1). W zależności od celu zastosowania i zakresu częstotliwości wymuszenia układ taki może być na przykład stosowany jako element nagrzewający z dobowym rozkładem źródeł ciepła [3] lub wbudowany w układy PCB składnik filtra sygnałowego o dobieranej częstotliwości odcięcia.



Rys. 1. Materiał kompozytowy Ω_M z przewodzącą warstwą elementów Ω_e osadzonych na nieprzewodzącym, elastycznym nośniku bazowym Ω_B

Pożądaną strukturę materiałową kształtujemy metodami ubytkowymi (trawienie), przyrostowymi (napylanie, drukowanie), bądź optycznymi (litografia interferencyjna) dając szeroki wachlarz możliwości dostosowania skali i struktury elementów Ω_e , co bezpośrednio determinuje wypadkowe cechy elektryczne Ω_M . Laminarne materiały warstwowe z możliwością elastycznego i szerokiego kształtowania pożądanego

właściwości są m.in. przedmiotem badań których celem jest opracowanie metod homogenizacji i predykcji ich wyników, efektywnych parametrów [1, 4].

Estymacja właściwości elektrycznych elementów Ω_e możliwa jest na podstawie analizy zjawisk elektromagnetycznych w numerycznym modelu komórki. Złożony opis zjawisk komplikuje silnie nieliniowy wpływ parametrów geometrii wewnętrznej komórki na lokalny rozkład pola elektrycznego. Również interpretowane makroskopowo zastępcze parametry elektryczne i magnetyczne (rezystancja, pojemność, indukcyjność) są nieliniową funkcją parametrów geometrycznych Ω_e . Uwzględnienie polowych zjawisk w obrębie komórek oraz pasożytniczych zjawisk elektrycznych i magnetycznych urzeczywistnia model. Nieliniowy charakter problemu oraz wpływ szeregu dodatkowych czynników utrudnia zadanie projektowania tego typu struktur. Toteż wielokryterialna analiza zjawisk w rozpatrywanych materiałach, prowadząca do znalezienia pożądanego, optymalnego rozwiązania zadanej problemu, wymaga wykorzystania iteracyjnych metod heurystycznych. Jednym z rozwiązań zagadnienia jest zastosowanie algorytmu optymalizacji inteligentnym rojem cząstek PSO (ang. *particle swarm optimization*) [7, 8].

W przedłożonym artykule rozpatrzono wykorzystanie struktury periodycznej, jako pasywnego filtra dolnoprzepustowego pierwszego rzędu o regulowanej na etapie projektowania częstotliwości odcięcia i możliwie najbardziej płaskiej charakterystyce amplitudowej w paśmie przenoszenia. Celem prac było zbadanie odpowiedzi częstotliwościowej elementu o proponowanej geometrii i zakresie regulacji parametrów. Trójwymiarowy model numeryczny układu utworzono z użyciem metody elementów skończonych (MES). Przyjęto monochromatyczne sformułowanie zagadnienia elektromagnetycznego (ang. *time harmonic*), z uwzględnieniem pomocniczego potencjału wektorowego pola. Optymalizację struktury elementu przeprowadzono przy zastosowaniu opracowanej implementacji algorytmu PSO. W toku prowadzonych prac poddano ocenie skuteczność i efektywność wykorzystania schematu PSO przy projektowaniu tego rodzaju struktur periodycznych.

Przyjęty model układu

W pierwszym przybliżeniu właściwości rozpatrywanych materiałów mogą być szacowane na podstawie złożonego modelu obwodowego o strukturze periodycznej. Układ dyskretnych, skupionych elementów odwzorowujących

geometrię obszaru przewodzącego jest w tym przypadku analizowany z pominięciem lokalnych zmian geometrii ścieżek oraz zjawisk polowych, które zachodzą w układzie. Takie sformułowanie problemu pomyślnie zweryfikowano w zakresie niskich częstotliwości [9]. W przypadku wymuszeń harmonicznym lub wymuszeń impulsowych, do opisu dyskutowanych struktur niezbędne jest zastosowanie trójwymiarowego modelu polowego.

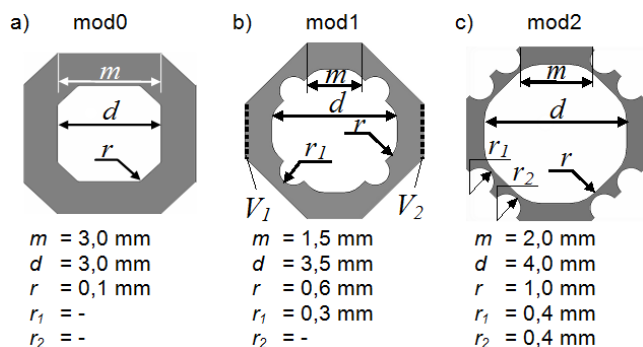
Przeprowadzona analiza zjawisk elektromagnetycznych w dziedzinie częstotliwości wymagała rozwiązania różniczkowego równania Helmholtza

$$(1) \quad \nabla^2 \mathbf{A} + \omega\mu(\omega\varepsilon - j\sigma)\mathbf{A} = \mu\sigma\nabla V$$

oraz dywergencji całkowitego prądu w układzie

$$(2) \quad \nabla \cdot (-\sigma\nabla V - j\omega\mu\sigma\mathbf{A}) = 0,$$

ze względu na wartość magnetycznego potencjału wektorowego \mathbf{A} i elektrycznego potencjału V , opisujących wektorowe pole harmoniczne w rozpatrywanym zakresie częstotliwości do 1 MHz. Przenikalność magnetyczna μ , elektryczna ε i przewodność σ wynikają z przestrzennego rozkładu materiałów w obrębie elementu Ω_e (rys. 2).



Rys. 2. Przykładowe warianty geometrii elementu Ω_e (warstwy przewodzącej) oraz zestawienie zmiennych determinujących właściwości $\mathbf{x}=[m, d, r, r_1, r_2]$

Wymuszenie w układzie zadano w postaci warunku brzegowego I-ego rodzaju na skrajnych krawędziach modelowanego elementu (rys. 2b), gdzie przyjęto potencjał odniesienia ($V_2 = 0$ V) i próbny potencjał jednostkowy ($V_1 = 1$ V). Rozwiązanie zagadnienia brzegowego (1)-(2) wyznaczono z wykorzystaniem MES. Ze względu na dyskretyzację równania po obszarze, w przyjętym modelu uwzględniono kształt ścieżek, lokalne zmiany geometrii i efekty naskórkowości występujące w obszarach przewężeń.

Opis analizowanego układu

W pracy rozważono trzy warianty geometrii elementów periodycznych. Różnią się one stopniem złożoności budowy, a tym samym liczbą doбираемых parametrów geometrycznych. Podstawowa konfiguracja mod0 (rys. 2a), to struktura ośmiokątna. Poprzez skalowanie wewnętrznego wycięcia d i promienia zagięcia r możliwa jest regulacja szerokości ścieżki przewodzącej. W bardziej zaawansowanym wariantcie mod1 (rys. 2b) dopuszczalna jest modyfikacja dodatkowego przewężenia w centrum ramienia komórki. W ten sposób następuje lokalne zwężenie przekroju elementu przewodzącego oraz zmiana drogi przepływu prądu elektrycznego, bez znaczących zmian długości. Najbardziej złożony wariant mod2 (rys. 2c) składa się z dwóch równomiernie rozlokowanych przewężeń ramienia. Budowa każdego z wariantów jest dostosowywana przez wybór wartości parametrów geometrycznych m, d, r, r_1, r_2 w całym dostępnym zakresie, prowadząc do coraz silniejszej deformacji kształtu.

Charakteryzacja właściwości elektromagnetycznych pojedynczego elementu obejmowała określenie jego charakterystyki amplitudowej. W modelu obwodowym, transmisyjne widmo amplitudowe układu filtrującego zależne jest od jego parametrów skupionych – rezystancji, indukcyjności, pojemności oraz topologii połączeń [10]. Rozważane struktury charakteryzują się znikomą pojemnością elektryczną, jednak geometria ścieżek przewodzących (długość drogi prądu oraz szerokość poprzeczna) decyduje o rezystancji $R_e(\mathbf{x})$ i indukcyjności $L_e(\mathbf{x})$ (średnia droga prądu elektrycznego oraz wypadkowe pole magnetyczne).

Dobór $R_e(\mathbf{x})$ i $L_e(\mathbf{x})$ kształtujących charakterystykę amplitudową Ω_e przeprowadzany jest w wyniku zastosowania schematu optymalizacji geometrii algorytmem PSO. Postawione zadanie polega na doborze wartości zmiennych wektora parametrów geometrycznych \mathbf{x} , którego rozmiar zależy od złożoności geometrii komórki. Dla wariantu mod0 na optymalizowany wektor

$$(3) \quad \mathbf{x}_0 = [m \ d \ r],$$

składa się: szerokość kontaktu m , a także średnica wycięcia d i promień zakrzywienia wewnętrznego r . Opis konfiguracji w przypadku wariantu mod1

$$(4) \quad \mathbf{x}_1 = [m \ d \ r \ r_1],$$

został rozszerzony o promień wewnętrznego wycięcia r_1 . Natomiast wektor wariantu mod2

$$(5) \quad \mathbf{x}_2 = [m \ d \ r \ r_1 \ r_2],$$

zwierał dodatkowo odrębne parametry r_1 i r_2 decydujące o promieniach wcięć na krawędzi.

Dyskutowane geometrie miały stałe rozmiary zewnętrzne ($\Delta_{e,x} \times \Delta_{e,y} \times \Delta_{e,z} = 5 \times 5 \times 0,2$ mm) i elektryczne parametry materiałowe odpowiadające czystej miedzi: $\varepsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$, $\sigma = 5,6 \cdot 10^7$ S/m. Podstawowy, proponowany materiał bazowy podłoża Ω_B (laminat FR-4) o właściwościach izolacyjnych ma znikomy wpływ na układ, dlatego pominięto go w dalszych rozważaniach.

Metoda doboru geometrii elementu

Problem optymalizacji zagadnienia wielu zmiennych o nieznanym charakterystyce wpływu można sprowadzić do znalezienia - z użyciem heurystycznych metod iteracyjnych - globalnego ekstremum przyjętej funkcji celu $F(\mathbf{x})$. Przykładem stosowanych metod są algorytmy genetyczne (GA), różnicowanie ewolucyjne (DE), sztuczna kolonia pszczół (ABC), czy optymalizacja rojem cząstek (PSO) [8]. Ostatnia metoda jest szczególnie interesująca ze względu na potencjalną odporność na wykrycie ekstremum lokalnego oraz efektywność poszukiwań, rozumianą jako liczba wariantów obliczanych w celu określenia globalnego ekstremum funkcji $F(\mathbf{x})$ lub jego bliskiego otoczenia. W przypadku zagadnień niealgorytmizowalnych, w których uzyskanie pojedynczego rozwiązania dla zadanych parametrów wejściowych może wymagać dużo czasu, wysoka efektywność algorytmu poszukiwań jest cechą pożądaną.

Algorytm PSO opiera się na wykorzystaniu skończonej populacji cząstek (agentów) – reprezentujących warianty konstrukcyjne układu. Różnorodność ich rozmieszczenia w przestrzeni zmiennych i otrzymane dla nich wartości funkcji celu $F(\mathbf{x})$, stanowią podstawę do oszacowania parametrów poprawy jakości rozwiązania przez modyfikację kierunku i wartości prędkości ich przemieszczenia, a w konsekwencji – położenia agentów w przestrzeni zmiennych. Dla każdego z agentów oraz całej ich populacji, w każdym kolejnym

etapie (iteracji) poszukiwani określa się najlepsze uzyskane rozwiązania, które wpływają na modyfikację wektorów prędkości [7, 8]

$$(6) \quad \mathbf{v}_{n+1}^i = w\mathbf{v}_n^i + c_1(\mathbf{x}_{n,best}^i - \mathbf{x}_n^i) + c_2(\mathbf{x}_{n,best}^g - \mathbf{x}_n^i),$$

zaś obliczona prędkość, skalowana przez współczynnik ścisłu t , określa nowe położenie agenta

$$(7) \quad \mathbf{x}_{n+1}^i = \mathbf{x}_n^i + t\mathbf{v}_{n+1}^i,$$

gdzie: \mathbf{v}_n^i - wektor prędkości i -tego agenta w n -tej iteracji,

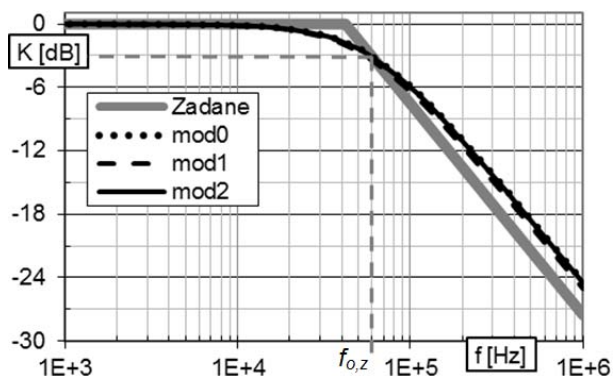
\mathbf{x}_n^i - wektor położenia i -tego agenta w n -tej iteracji, $\mathbf{x}_{n,best}^i$ - najlepsze bieżące położenie i -tego agenta, $\mathbf{x}_{n,best}^g$ - najlepsze bieżące położenie lidera roju. W prowadzonych badaniach założono stałe wartości współczynników wagowych c_1 , c_2 , oraz współczynnika ścisłu t , a także współczynnika inercji w , decydującego o stopniu swobody ruchu agentów w przestrzeni zmiennych.

Algorytm wykonywany jest aż zostanie spełnione wybrane kryterium zakończenia. Może być nim wykonanie określonej liczby etapów (iteracji) lub osiągnięcie zadanej, przyjmowanej przedziałowo, wartości funkcji celu.

Algorytm wykonywany jest aż zostanie spełnione wybrane kryterium zakończenia. Może być nim wykonanie określonej liczby etapów (iteracji) lub osiągnięcie zadanej, przyjmowanej przedziałowo, wartości funkcji celu.

Analiza rezultatów

Efektywność optymalizacji struktury elementu Ω_e za pomocą algorytmu PSO, w przedziale częstotliwości od 1 kHz do 1 MHz, weryfikowano poprzez zadanie zdefiniowanej, idealnej charakterystyki amplitudowej o płaskim paśmie przepuszczania, stałej stromości 20 dB/dek w paśmie zaporowym i określonej częstotliwości odcięcia $f_{o,z}$. Zadaniem algorytmu był taki dobór wektorów \mathbf{x}_0 , \mathbf{x}_1 , \mathbf{x}_2 , aby zminimalizowana została funkcja celu $F(\mathbf{x})$, czyli błąd średniokwadratowy między charakterystyką elementu a charakterystyką zadaną. Przestrzeń minimalizowanej funkcji celu była przeszukiwana z użyciem 4-ech agentów (cząstek).

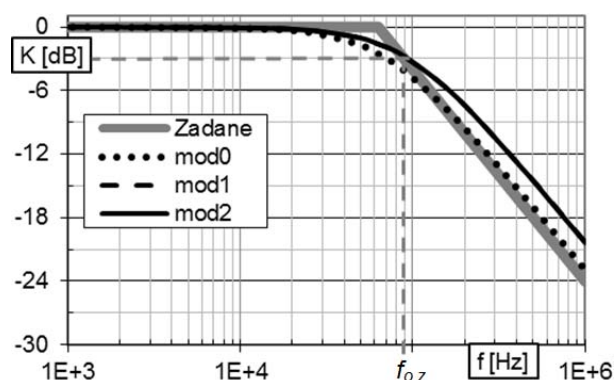


Rys. 3. Charakterystyki amplitudowe optymalnych wariantów warstwy przewodzącej przy $f_{o,z} = 60$ kHz

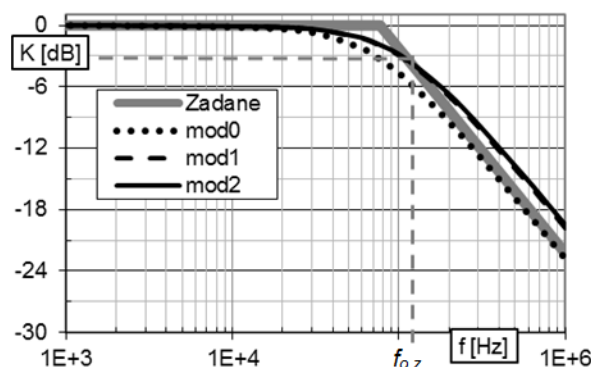
Częstotliwość odcięcia pierwszej z zadanych charakterystyk wynosiła 60 kHz i z podobną dokładnością została osiągnięta przez każdy z wariantów. Otrzymane przebiegi pokrywają się (rys. 3), przechodząc przez wskazany punkt o wzmacnieniu $K = -3$ dB przy $f_{o,z}$. Już w tym przypadku zauważyć można, że dopasowanie nie jest idealne – powyżej 10 kHz rzeczywiste charakterystyki delikatnie opadają, zaś dokładność dopasowania do $f_{o,z}$ okupiona jest zauważalnym niedopasowaniem w paśmie blokowania. Powyżej 100 kHz zachowana jest jednak stała, wymagana tłumienność na poziomie 20 dB/dek.

Kolejne charakterystyki (rys. 4, 5) kształtowane przy wyższych $f_{o,z}$ wskazują na coraz istotniejszą rozbieżność

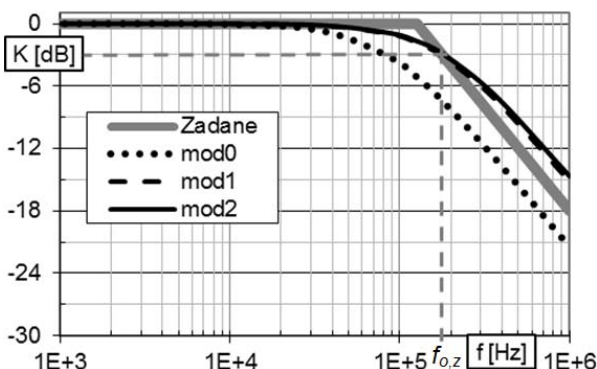
między wariantami. Na przykład dla mod0 poprawiono dopasowanie w paśmie zaporowym oraz zachowano względnie płaską część charakterystyki w paśmie przepuszczania, lecz częstotliwość odcięcia jest mniejsza od zadanej. Warianty mod1, mod2 pokrywają się, szczególnie dla $f_{o,z} < 110$ kHz. Nie obserwuje się istotnego wpływu efektu naskórkowości, który wobec wzrostu rezystancji zwiększa stromość charakterystyki w paśmie przewodzenia powodując jej przedwczesne obniżanie. Jednak nawet przy częstotliwości odcięcia sięgającej 180 kHz (rys. 6), efekt ten jest zauważalny jedynie dla mod0. Najprostsza geometria elementu, pozbawiona wcięć w ścieżkach przewodzących redukujących zastępczą wartość rezystancji komórki, w wyniku przeprowadzonej optymalizacji nie prowadzi do konfiguracji, której charakterystyka widmowa spełnia warunek dopasowania do zadanej funkcji. Natomiast warianty mod1 i mod2 w równym stopniu, pomimo odmiennej geometrii, umożliwiają osiągnięcie wyższych częstotliwości odcięcia i zakładanego pasma przepuszczania.



Rys. 4. Charakterystyki amplitudowe optymalnych wariantów warstwy przewodzącej przy $f_{o,z} = 90$ kHz



Rys. 5. Charakterystyki amplitudowe optymalnych wariantów warstwy przewodzącej przy $f_{o,z} = 110$ kHz



Rys. 6. Charakterystyki amplitudowe optymalnych wariantów warstwy przewodzącej przy $f_{o,z} = 180$ kHz

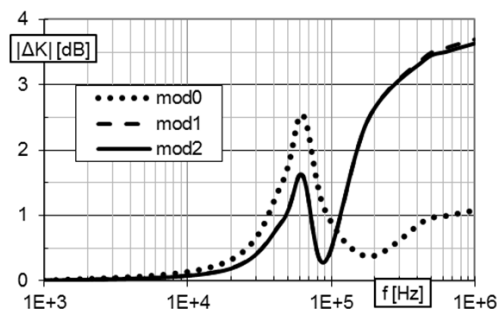
W przypadku jednorodnej płytki miedzianej o identycznych jak elementy Ω_e rozmiarach zewnętrznych ($\Delta_{e,x} \times \Delta_{e,y} \times \Delta_{e,z}$) częstotliwość odcięcia wynosiła $f_o = 10$ kHz. Zmiana f_o , przy tych samych parametrach materiałowych, jest możliwa w wyniku modyfikacji skali rozmiarów płytki. Jednak kształtowanie charakterystyki przez formowanie kształtu w obrębie zadanych rozmiarów, umożliwia przesunięcie f_o do wielokrotnie większej wartości.

W dalszej części badań określono bezwzględne błędy średniokwadratowe (Tab. 1) uzyskanych charakterystyk względem zadanej dla: pasma przepuszczania $|\Delta K_p|$, blokowania $|\Delta K_b|$ i dopasowania do częstotliwości odcięcia $|\Delta K_o|$. Ten ostatni błąd był szczególnie istotny, gdyż opisywał podlegający szerokiej regulacji charakterystyczny punkt widma amplitudowego. Uzyskane wyniki odznaczają się najmniejszymi błędami właśnie przy dostosowaniu do pożądanej wartości częstotliwości odcięcia $f_{o,z}$ z wyjątkiem mod0 dla $f_{o,z}$ powyżej 100 kHz.

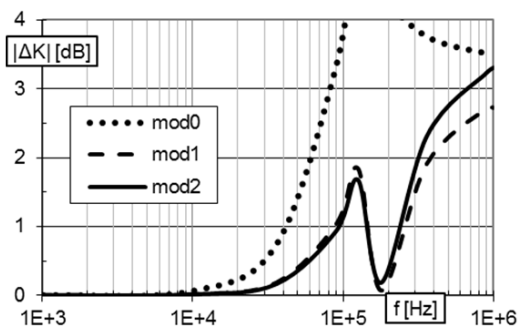
Tab. 1. Błędy bezwzględne dopasowania charakterystyki w [dB]

$f_{o,z}$ [kHz]	mod0			mod1			mod2		
	$ \Delta K_p $	$ \Delta K_o $	$ \Delta K_b $	$ \Delta K_p $	$ \Delta K_o $	$ \Delta K_b $	$ \Delta K_p $	$ \Delta K_o $	$ \Delta K_b $
60	1,02	0,04	2,78	1,16	0,34	2,15	1,05	0,04	2,67
90	1,48	1,09	0,88	0,93	0,27	3,32	0,92	0,29	3,28
110	1,96	2,16	0,74	1,16	0,32	2,18	1,10	0,18	2,49
180	2,76	4,39	3,59	0,95	0,07	2,48	0,86	0,19	2,99

Błędy dopasowania mod0 rosną wraz z $f_{o,z}$ (Tab. 1), chociaż dla niskich jej wartości są one niższe niż dla zaawansowanych wariantów (np. przy $f_{o,z} = 60$ kHz, błąd $|\Delta K_p|$ wynosi 1,02 dB dla mod0, a dla mod1 uzyskano 1,16 dB). W przypadku wyższych częstotliwości zaporowych $f_{o,z}$ (rys. 8) geometria mod0 jest niewystarczająca. Pojawiają się znaczące błędy niedopasowania, np. $|\Delta K_b| = 3,59$ dB, $|\Delta K_o| = 4,39$ dB. Lepsze dopasowanie do zadanej charakterystyki uzyskuje się stosując geometrię mod1 ($|\Delta K_p| = 0,95$ dB, $|\Delta K_b| = 2,48$ dB, $|\Delta K_o| = 0,07$ dB).



Rys. 7. Błąd bezwzględny aproksymacji charakterystyk amplitudowych przy $f_{o,z} = 90$ kHz



Rys. 8. Błąd bezwzględny aproksymacji charakterystyk amplitudowych przy $f_{o,z} = 180$ kHz

Bezwzględny błąd średniokwadratowy jest funkcją wielu zmiennych: $|\Delta K| = f(f_{o,z}, f, m, d, r, r_1, r_2)$. Najmniejsze jego

wartości obserwuje się w paśmie przepustowym, lecz zawsze narastają one gwałtownie w paśmie przejściowym (rys. 8). Warianty mod1 i mod2 pozwalają na minimalizację błędów w obszarze $f_{o,z}$ (rys. 7, 8) kosztem większego błędów w paśmie zaporowym. Odwrotną tendencję obserwuje się dla wariantu mod0.

Podsumowanie

Przedmiotem badań są materiały z warstwą periodyczną zbudowaną z komórek o właściwościach kształtowanych na poziomie geometrii i materiału budującego. Optymalizację struktury elementu zrealizowano przy wykorzystaniu algorytmu PSO. Efektem pracy algorytmu było zdefiniowanie optymalnych wartości parametrów w wektorze charakteryzującym budowę Ω_e .

Proponowane geometrie różniły się stopniem złożoności ich kształtu, a tym samym rozmiarem optymalizowanego wektora niewiadomych. Rezultaty obliczeń wskazują na zdecydowaną poprawę dokładności odwzorowania zadanej charakterystyki amplitudowej, po zastosowaniu wariantów mod1 i mod2. Zapewniają one także szersze pasmo doboru częstotliwości odcięcia sięgające do 180 kHz. Różnica między tymi wariantami nie jest znacząca, toteż wobec mniejszej liczby dobieranych przez algorytm parametrów, efektywniejszym rozwiązaniem jest mod1. Charakterystyki amplitudowe geometrii mod0 z mniejszym błędem dopasowują się do charakterystyki zadanej w paśmie zaporowym, co wiąże się z silniejszym tłumieniem po przekroczeniu zadanej częstotliwości odcięcia.

Możliwe jest zastosowanie każdego z prezentowanych wariantów w charakterze filtra dolnoprzepustowego o precyzyjnie dobieranej częstotliwości odcięcia. Ze względu na pomijalną wartość pojemności, komórki umożliwiają osiągnięcie tłumienności 20 dB/dek odpowiadającej filtrowi pierwszego rzędu.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy S/WE/1/2013 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

Autorzy: mgr inż. Adam Steckiewicz, dr inż. Agnieszka Choroszucho, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, e-mail: a.steckiewicz@doktoranci.pb.edu.pl, a.choroszucho@pb.edu.pl

LITERATURA

- [1] Abramovich H., *Intelligent materials and structures*, De Gruyter (2016)
- [2] Moore R., *Electromagnetic composites handbook*, McGraw-Hill (2016)
- [3] Pal R., *Electromagnetic, mechanical, and transport properties of composite materials*, CRC Press (2014)
- [4] Castro H.F., et al., All-inkjet-printed low-pass filters with adjustable cutoff frequency consisting of resistors, inductors and transistors for sensor applications, *Organic Electronics*, 38 (2016), 205-212
- [5] Abegaonkar M., Kurra, L., Koul S.K., *Printed resonant periodic structures and their applications*, CRC Press (2016)
- [6] Hernandez L., et al., Low-loss RF filter through a combination of additive manufacturing and thin-film process, *IEEE Radio and Wireless Symposium* (2017), 114-116
- [7] Ho S.L., Yang S., An artificial bee colony algorithm for inverse problems, *Int. Journal of Applied Electromag. and Mechanics*, 31 (2009), 181-192
- [8] Konar M., Bagis A., Performance comparison of particle swarm optimization, differential evolution and artificial bee colony algorithms for fuzzy modelling of nonlinear systems, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 22(5) (2016), 8-13
- [9] Steckiewicz A., Porównanie metod obwodowych i numerycznych do obliczeń stacjonarnego pola elektrycznego w materiałach warstwowych, *Poznan Univ. of Tech. Academic Journals: Electrical Engineering* (2017), n.89, 123-134
- [10] Pasko M., Adrikowski T., *Elementy liniowych obwodów elektrycznych i elektronicznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej (2011)