

Optymalizacja numeryczna układów pasywnych b.w.cz. z wykorzystaniem MES

Streszczenie. W artykule przedstawiony został zestaw technik numerycznych umożliwiających efektywną optymalizację numeryczną układów pasywnych b.w.cz. z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Techniki te obejmują metody redukcji rzędu modelu, wyznaczania czułości odpowiedzi układu na zaburzenia zmiennych projektowych oraz algorytmy deformacji siatki. Odpowiednie połączenie powyższych technik numerycznych pozwala na stworzenie efektywnego narzędzia wspomagającego projektowanie układów pasywnych w.cz.

Abstract. In this paper a set of numerical techniques for efficient numerical optimization of high frequency passive devices with 3D finite element method is shown. Presented numerical techniques involve model order reduction methods, fast sensitivity analysis techniques and mesh deformation methods. It is proved that careful integration of those techniques allows one to create an efficient platform for design-by-optimization of passive high frequency components. (**Numerical optimization of passive, high frequency devices with 3D FEM.**)

Słowa kluczowe: metoda elementów skończonych, układy wysokiej częstotliwości, układy pasywne, techniki optymalizacyjne, CAD.

Keywords: finite element method, high frequency circuits, passive devices, optimization techniques, CAD.

Wprowadzenie

Projektowanie układów pasywnych wysokiej częstotliwości używanych w nowoczesnych systemach bezprzewodowych coraz częściej wymaga stosowania kosztownych numerycznie symulacji pełnofalowych, w których wielokrotnie rozwiązuje się równania Maxwella, dla różnych warunków brzegowych. Związane jest to z dużą złożonością ww. układów wynikającą z potrzeby ich miniaturyzacji, a także rosnących wymagań co do ich specyfikacji elektrycznej. Przykładem mogą być układy filtrujące w.cz. – kolejne generacje systemów wymagają zwiększenia ich selektywności, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniego kształtu charakterystyki opóźnienia grupowego oraz zapewnieniu niewielkich rozmiarów.

Jedną z najczęściej wykorzystywanych technik symulacyjnych wykorzystywanych na etapie projektowania komponentów pasywnych w.cz. jest metoda elementów skończonych (MES). Jej główną zaletą jest możliwość analizy układów o niemal dowolnej, złożonej geometrii, w tym zawierających różne materiały dielektryczne. Wadą MES jest stosunkowo duży koszt numeryczny samej symulacji – w przypadku złożonych struktur metoda wymaga rozwiązania układu równań liniowych zawierających miliony lub dziesiątki milionów niewiadomych. Z tego powodu dotychczas metoda ta używana była głównie jako narzędzie symulacyjne, natomiast wysoki koszt numeryczny niemal wykluczał zastosowanie MES w pętli optymalizacyjnej. W niniejszym artykule przedstawiony został zestaw technik numerycznych, których połączenie z MES pozwala na ominięcie dotychczasowych ograniczeń i przeprowadzenie skutecznej optymalizacji numerycznej złożonych układów pasywnych.

Sformułowanie MES

W niniejszej pracy użyte jest sformułowanie metody elementów skończonych dla pola elektrycznego analogiczne do zaproponowanego w [1] oraz wektorowe, hierarchiczne funkcje bazowe [2]. Dla zadanej struktury 3D poszukiwane jest rozwiązanie równania falowego

$$(1) \quad \nabla \times \mu^{-1} \nabla \times E - k_0^2 \epsilon_r E = 0$$

spełniające dodatkowe warunki brzegowe, odpowiadające idealnym ściankom elektrycznym lub magnetycznym oraz pobudzeniom we wrotach układu. Zastosowanie metody elementów skończonych oparte o metodę Galerkiną

pozwała na sprowadzenie zagadnienia (1) do problemu liniowego postaci

$$(2) \quad (S - k_0^2 T) X = B$$

gdzie S oraz T to rzadkie macierze sztywności i bezwładności, macierz kolumnowa B odpowiada pobudzeniom we wrotach układu. Rozwiązanie X związane jest z rozkładem pola elektromagnetycznego wewnątrz analizowanej struktury przy zadanym pobudzeniu. Na podstawie znajomości rozwiązania X możliwe jest ostateczne wyznaczenie parametrów impedancyjnych we wrotach układu korzystając z zależności

$$(3) \quad Z(j\omega) = j\omega \epsilon_0 \cdot B \cdot X^T$$

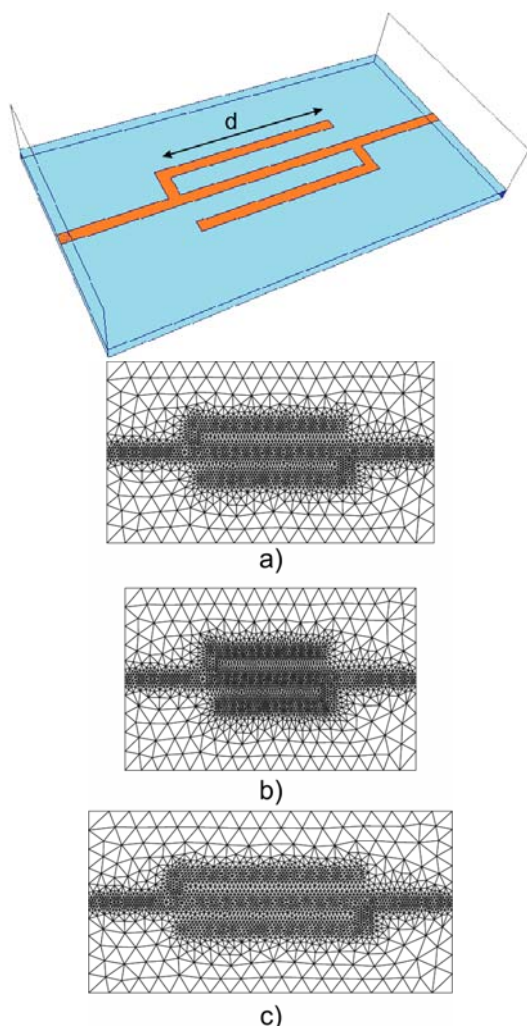
Problem liniowy (2) rozwiązywany jest zwykle dla zadanego zestawu dyskretnych częstotliwości zdefiniowanych w określonym pasmie. Macierze S oraz T są kwadratowymi macierzami rzadkimi o dużych rozmiarach, sięgających dziesiątków milionów wierszy. Z tego powodu główny koszt numeryczny MES związany jest z wielokrotnym rozwiązaniem problemu (2) – niezależnie dla każdej częstotliwości.

Metody redukcji rzędu modelu

W przypadku gdy poszukiwana jest funkcja przenoszenia układu pomiędzy zdefiniowanymi wrotami, możliwe jest znaczne zmniejszenie kosztu numerycznego związanego z wyznaczeniem odpowiedzi układu w zadanym pasmie częstotliwości poprzez zastosowanie technik redukcji rzędu modelu (MOR). Metody te pozwalają na utworzenie systemu który, w ograniczonym pasmie częstotliwości w okolicy zadanego punktu częstotliwości, poprawnie przybliży odpowiedź systemu oryginalnego, ale jednocześnie ma dużo mniejszy rozmiar. Jedną z technik redukcji przeznaczonych dla systemów drugiego rzędu jest algorytm SAPOR [3]. W metodzie tej w oparciu o zasadę zgodności momentów wyznacza się ortogonalną bazę V za pomocą której dokonuje się projekcji systemu oryginalnego otrzymując system zredukowany. Jedną z podstawowych zalet algorytmu SAPOR jest to, że na etapie konstrukcji macierzy rzutowania V , konieczna jest tylko jednokrotna faktoryzacja numeryczna macierzy głównej (2) oryginalnego problemu MES. Wyznaczenie odpowiedzi układu bazuje na modelu o niewielkim (w stosunku do oryginalnego) rozmiarze i jest bardzo szybkie w porównaniu z systemem oryginalnym.

Techniki deformacji siatki

W praktyce projektowej układów b.w.cz. wymagane jest dostosowanie odpowiedzi układu do zadanej specyfikacji elektrycznej. W przypadku układów pasywnych proces ten wymaga wielokrotnej zmiany ich geometrii i każdorazowej symulacji elektromagnetycznej w celu obserwacji zmian w funkcji przenoszenia. Liczba parametrów geometrycznych w przypadku złożonych układów może sięgać kilkadziesiąt. W przypadku analizy układów metodą elementów skończonych każda zmiana geometrii układu powoduje konieczność ponownej generacji siatki i przeprowadzenia pełnej symulacji od początku. Proces ten jest bardzo kosztowny, a sama regeneracja siatki wprowadza dodatkowy szum numeryczny - zaobserwować można brak ciągłości odpowiedzi układu w funkcji ciągłej zmiany jego geometrii. Aby tego uniknąć zastosować można techniki deformacji siatki [4, 5]. Metody te pozwalają na kontrolowane przekształcenie siatki przy zmianie geometrii struktury, przy jednoczesnym zachowaniu jej topologii. Na rysunku 1 przedstawiona została koncepcja deformacji siatki w przypadku prostej struktury planarnej dwóch sęków wykonanych w technologii niesymetrycznej linii paskowej. Dla tej struktury utworzona została siatka początkowa (a), a następnie zmieniona została długość sęków d . Zastosowanie technik deformacji siatki umożliwia transformację siatki początkowej przy zmianie geometrii (b)(c).



Rys. 1. Struktura sęków równoległych w niesymetrycznej linii paskowej oraz odpowiadające jej siatki na powierzchni dielektryka: a) siatka początkowa, b) siatka po deformacji przy zmniejszeniu długości sęków, c) siatka po deformacji przy zwiększeniu długości sęków. Siatki mają tę samą topologię

Aktualne znane techniki deformacji siatki pozwalają na transformację siatek dla bardzo złożonych obiektów trójwymiarowych. Jak dotąd techniki te nie są zaimplementowane w powszechnie stosowanych pakietach do symulacji elektromagnetycznych bazujących na MES.

Analiza zaburzeń

W przypadku złożonych układów pasywnych często jedyną metodą uzyskania zadowalającego z punktu widzenia wymaganej specyfikacji elektrycznej projektu jest optymalizacja numeryczna z odpowiednio zdefiniowaną funkcją celu opartą o parametry transmisyjne układu. Z uwagi na ogromny koszt pojedynczej symulacji oraz dużą liczbę zmiennych projektowych na tym etapie najczęściej wykorzystywane są techniki optymalizacji gradientowej. W takim przypadku wyzwaniem jest już samo wyznaczenie gradientu funkcji celu. Zastosowanie prostych schematów różnicowych (bazujących na niezależnych symulacjach przy zaburzeniu parametrów) jest niepraktyczne – wyznaczenie pojedynczego gradientu zająć może wiele godzin lub dni. Dużo efektywniejszym rozwiązaniem jest wyznaczenie każdorazowo wektorów przesunięć węzłów siatki przy niewielkiej zmianie parametru projektowego. Na tej podstawie możliwe jest wyznaczenie poprawek macierzy sztywności i bezwładności ΔS i ΔT , które rzutowane są następnie do przestrzeni modelu zredukowanego. Model ten jest aktualizowany i wyznaczana jest jego funkcja przenoszenia, na podstawie której możliwe jest już wyznaczenie pochodnej funkcji celu.

Przetwarzanie geometrii

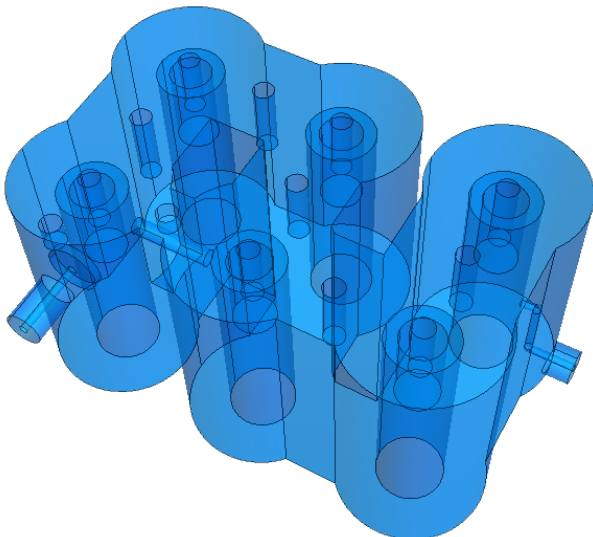
Specyfika analizy układów 3D o złożonej geometrii z wykorzystaniem MES wymusza zastosowanie specjalizowanego oprogramowania do wprowadzania i edycji geometrii. W przypadku, gdy oprócz samej symulacji rozważana jest także optymalizacja numeryczna, konieczne jest aby moduł ten wyposażony był w dodatkowe funkcjonalności, tj.:

- Pełną parametryzację geometrii realizowaną poprzez możliwość definiowania zmiennych oraz równań,
- Możliwość wyznaczania przesunięć węzłów siatki przy niewielkiej zmianie geometrii. Pozwala to na efektywne wyznaczenie czułości odpowiedzi na zmiany zmienne projektowych,
- Integracja z modułem symulacyjnym i możliwość włączenia własnych technik optymalizacyjnych, np. w postaci skryptów zewnętrznych uruchamianych w środowisku Matlab.

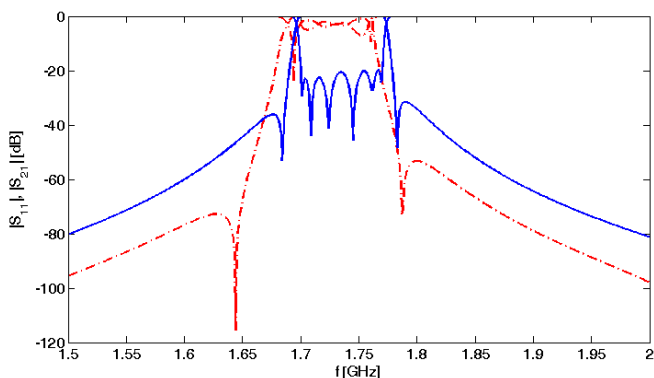
Przykład

Opisane powyżej techniki numeryczne zintegrowane zostały w rozwijanym przy współpracy z Politechniką Gdańską trójwymiarowym symulatorem elektromagnetycznym InventSim [6, 7]. Na rysunku 2 pokazana jest przykładowa struktura układu filtra grzebieniowego 6-go rzędu z jednym sprzężeniem skośnym realizującym dwa zera w charakterystyce transmisyjnej. W strukturze tej zdefiniowanych zostało 15 zmiennych projektowych określających: długości śrub strojących kontrolujących częstotliwości rezonansowe kolejnych rezonatorów, sprzężeń pomiędzy nimi oraz układ zasilania pierwszego i ostatniego rezonatora. Pożądana selektywność układu ma odpowiadać charakterystyce Czebyszewa filtra 6-go rzędu na pasmo 1,7 GHz-1,77 GHz z dwoma zerami transmisyjnymi na częstotliwościach 1,686 GHz i 1,785 GHz oraz poziomem strat odbiciowych powyżej 20dB. Układ ten po wstępnej syntezie poddano optymalizacji z wykorzystaniem opisanych powyżej technik numerycznych. Podczas optymalizacji zastosowana została funkcji celu

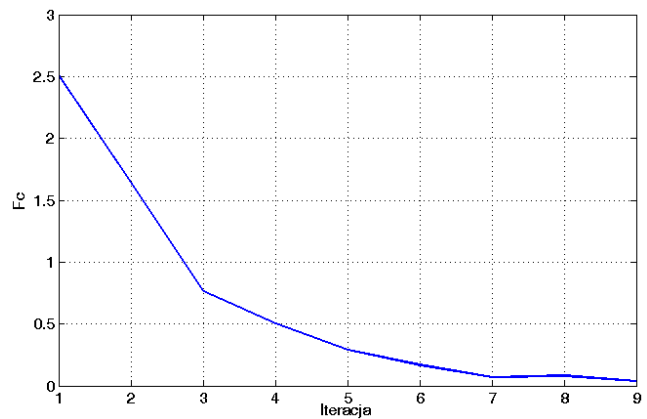
oparta na zerach i biegunach funkcji przenoszenia [8, 9]. Dla struktury wygenerowana została siatka składająca się z 79000 elementów czworościennych, a rozmiar problemu liniowego sięgał 450 000 niewiadomych (do analizy wykorzystane zostały funkcje bazowe 2-go rzędu). W tym przypadku, czas pełnej symulacji MES dla 32 punktów częstotliwości wraz z wyznaczeniem czułości odpowiedzi układu na 15 zmiennych projektowych to zaledwie 78s (Intel i7 870, 2.93GHz, 16GB RAM). Na rysunku 3 przedstawiona jest odpowiedź układu przed i po optymalizacji – jak widać końcowa odpowiedź bardzo dobrze odpowiada założeniom projektowym. W czasie procedury optymalizacyjnej wykonano zaledwie 9 iteracji, a zbieżność procesu optymalizacyjnego pokazana jest na rysunku 4. Przykład ten pokazuje wyraźnie, że odpowiednie połączenie zaproponowanych technik numerycznych pozwala na przeprowadzenie skutecznej optymalizacji złożonych układów pasywnych z wykorzystaniem MES.



Rys. 2. Widok 3D struktury filtra grzebieniowego 6-go rzędu z jednym sprzężeniem skrośnym realizującym dwa zera w charakterystyce transmisyjnej



Rys. 3. Odpowiedź układu przed (linia przerywana) i po (linia ciągła) optymalizacji



Rys. 4. Zbieżność algorytmu optymalizacyjnego

Przedstawione wyniki powstały w wyniku prac badawczych prowadzonych w ramach projektów NCBiR Lider/21/148/L-1/09/NCBiR/2010 oraz NCN UMO-2013/09/B/ST7/04202.

Autorzy: dr inż. Adam Lamecki, dr inż. Łukasz Balewski, prof. dr hab. inż. Michał Mrozowski, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: adlam@eti.pg.gda.pl, lukasz.balewski@eti.pg.gda.pl, michal.mrozowski@eti.pg.gda.pl

LITERATURA

- [1] Rubio J., Arroyo J. and Zapata J., Analysis of Passive Microwave Circuits by Using a Hybrid 2-D and 3-D Finite Element Mode-Matching Method, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, Sept. 1999
- [2] Ingelstrom P., A New Set of H(curl)-Conforming Hierarchical Basis Functions for Tetrahedral Meshes, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, Jan. 2006
- [3] Su Y., Wang J., Zeng X., Bai Z., Chiang C., Zhou D., SAPOR: Second-order Arnoldi method for passive order reduction of RCS circuits, *IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design*, Digest of Technical Papers, ICCAD. 2004. 74-79
- [4] Alexa M., Recent advances in mesh morphing, *Computer Graphics Forum*, vol. 21, 173-198, June 2002
- [5] Staten M.L., Owen S.J., Shontz S.M., Salinger A.G., and Coffey T.S., A comparison of mesh morphing methods for 3D shape optimization, in *20th International Meshing Roundtable*. October 23-26: Springer-Verlag, (2011), 293-310
- [6] Lamecki A., Mrozowski M., Balewski L., An Efficient Framework For Fast Computer Aided Design of Microwave Circuits Based on the Higher-Order 3D Finite-Element Method, *Radioengineering*, Vol. 23, No. 4, Dec. 2014
- [7] Online: http://eminvent.com/em_overview.html
- [8] Kozakowski P., Mrozowski M., Automated CAD of coupled resonator filters, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.12, no.12, 470-472, Dec 2002
- [9] Kozakowski P., Mrozowski M., Quadratic Programming Approach to Coupled Resonator Filter CAD, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.54, no.11, 3906-3913, Nov. 2006