

Wykorzystanie symulacji komputerowych do poprawy konstrukcji linii paskowej

Streszczenie. W artykule przedstawiono wykorzystanie symulacji komputerowych do poprawienia dopasowania istniejącej linii paskowej do układu zasilania. Przy pomocy modelu linii paskowej zbudowanego w programie COMSOL Multiphysics dokonano analizy rozkładu pola elektromagnetycznego i wyznaczono zastępcze charakterystyki częstotliwościowe, które można było zweryfikować na drodze pomiarów. Po upewnieniu się, że model komputerowy dobrze odzwierciedla badaną linię paskową, wykorzystano go do zbadania wpływu modyfikacji konstrukcji na współczynnik odbicia, istotny ze względu wykorzystania energii dostarczanej przez generator. Symulacje pozwoliły na znalezienie prostej metody poprawy dopasowania linii do generatora, a pomiary zmodyfikowanego urządzenia potwierdziły wyniki symulacji.

Abstract. Paper presents application of numerical simulation to improve construction of an existing stripline used for EMC immunity tests. With help of the stripline numerical model the authors were able to compute frequency characteristics (i.e. reflection coefficient or input impedance) which were verified by measurements. The verified model was then used to simulate characteristics for alternative details of the construction, what allowed significant improvement of the stripline to signal generator match. The results were confirmed by the measurement of the modified stripline. (Using Computer Modeling to Improve Design of a Stripline)

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, badania narażeniowe, linia paskowa, MES

Keywords: electromagnetic compatibility, immunity tests, stripline, FEM

doi:10.12915/pe.2014.08.12

Wprowadzenie

Celem badań opisanych w tym artykule jest weryfikacja działania istniejącej linii paskowej, służącej do projektowych badań odporności elektromagnetycznej podzespołów precyzyjnych wag elektronicznych. Istotnym elementem w badaniach odporności jest odpowiednia jakość, tj. natężenie i równomierność pola elektrycznego w szerokim zakresie częstotliwości. Pokażemy, że zarówno analiza skuteczności działania istniejącej linii jak i poprawa jej konstrukcji może być efektywnie wykonana za pomocą symulacji komputerowych.

Pomiary w liniach paskowych to uznana metoda badania odporności niewielkich urządzeń elektronicznych na zakłócenia polem elektromagnetycznym RF w zakresie do około 150 MHz (dopuszczanym przez normy) [5, 2, 7]. Mimo ograniczonego zakresu częstotliwości metoda ta posiada wiele zalet, z których najważniejsze to: duża jednorodność pola wewnątrz linii, powtarzalność testów, niska cena oraz możliwość wykorzystania źródeł (generatorów sygnałowych) o niewielkiej mocy, co znacznie obniża koszty badań. Ze względu na te zalety prowadzone są liczne prace nad zwiększeniem zakresu częstotliwości [1] i rozmiarów urządzeń [3].

Zdaniem autorów taka metoda może być stosowana do projektowych badań odporności wag elektronicznych, które wprawdzie zgodnie z obowiązującymi normami powinny tolerować narażenie polem elektromagnetycznym o natężeniu 3 V/m (z 80% modulacją amplitudy) w zakresie od 26 MHz do 1 GHz, ale możliwe jest przeprowadzenie w linii paskowej testów, których przejście pozwoli uzyskać dużą pewność, że urządzenie wytrzyma testy przeprowadzone zgodnie z aktualnie obowiązującą normą PN-EN-45501. Przewidywana od kilku lat aktualizacja normy przewiduje co prawda zwiększenie limitu tolerancji do 10 V/m i zakresu częstotliwości do 2 GHz, ale ta zmiana budzi liczne kontrowersje i można przypuszczać, że linia paskowa będzie jeszcze przez jakiś czas wystarczającą metodą badań projektowych [6].

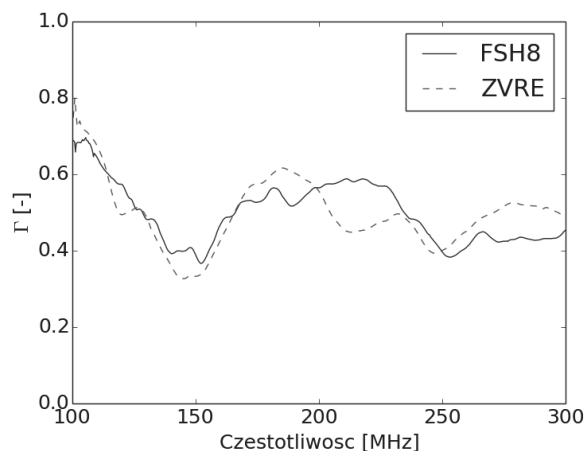
Badana linia paskowa, przedstawiona na Rys. 1, wykonana jest z płyt tekstolitowych pokrytych jednostronnie miedzią, umocowanych na drewnianym stelażu. Wejście w postaci gniazda N, zamocowanego w plastikowej obudowie zostało przylutowane do płyt. Na drugim końcu linii wlotowano równolegle dwa rezystory o nominalnej rezystancji 681 Ω każdy. Zmierzona rezystancja obciążenia to 337 Ω .



Rys. 1. Widok badanej linii paskowej

Pomiary

W celu walidacji numerycznego modelu linii paskowej wykonano pomiary współczynnika odbicia przy pomocy dwóch różnych urządzeń firmy Rohde & Schwarz: ZVRE (wektorowy analizator obwodów) oraz FSH8 (przenośny analizator widma i skalarny analizator obwodów) są zbliżone, ale różnią się dość istotnie w szczegółach (por. Rys. 2). Jak widać, w przedziale częstotliwości 100-300 MHz linia paskowa odbija około 40-70% mocy podawanej na jej wejście

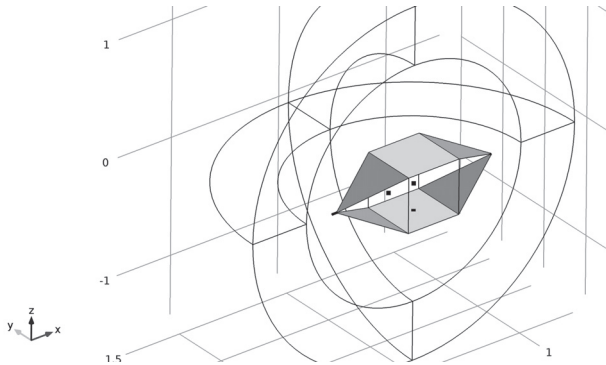


Rys. 2. Porównanie wyników pomiaru współczynnika odbicia istniejącej linii paskowej

cie. Daje to podstawy sądzić, że komputerowy model będzie mógł posłużyć do lepszego wykorzystania dostępnego generatora sygnałowego i w konsekwencji poprawienia jakości pola elektrycznego generowanego przez linię.

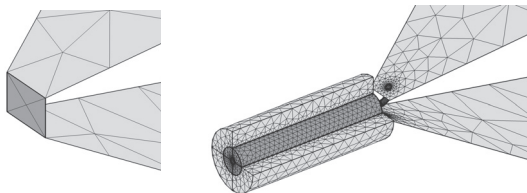
Model numeryczny

Numeryczny model został wykonany w oparciu o Metodę Elementów Skończonych za pomocą pakietu symulacyjnego COMSOL Multiphysics. Model obejmuje linię paskową oraz jej otoczenie powietrzne wraz z warstwą Perfectly Matched Layer symulującą obszar nieograniczony. Ponieważ badana struktura nie promieniuje silnie na zewnątrz, warstwa PML nie musiała być bardzo oddalona — modelowane otoczenie to sfera o promieniu 1.5 m, z czego 0.5 m to warstwa PML.



Rys. 3. Widok modelu numerycznego

Istotny wpływ na zgodność wyników symulacji z danymi pomiarowymi ma model zasilania. Najprostszy model polegający na zadaniu napięcia pomiędzy dwoma „paskami” linii przedstawiony jest na Rys. 4 po lewej stronie. Jak pokazuje Rys. 5, bliższy rzeczywistości jest bardziej skomplikowany geometrycznie model uwzględniający budowę wejściowego portu typu N (por. prawa strona Rys. 4).



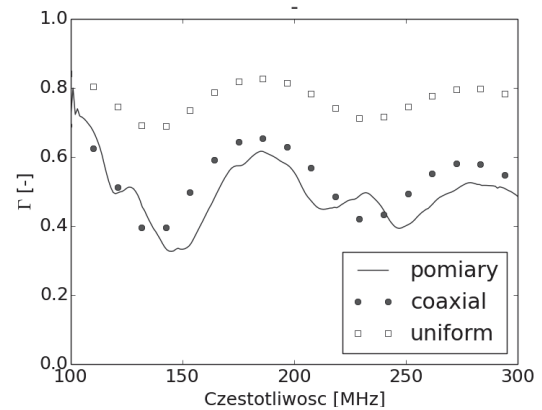
Rys. 4. Po lewej: prosty model zasilania (Uniform Lumped Port), po prawej: model portu typu N (Coaxial Lumped Port)

Wykres przedstawiony na Rys. 5 przedstawia wyniki symulacji linii z uproszczonym (Uniform Port) jak i dokładniejszym (Coaxial Port) modelem przyłącza wejściowego. Jak można zauważyć, obydwa podejścia dobrze odwzorowują przebieg charakterystyki odbiciowej linii paskowej, ale prosty model zawyża wartości współczynnika odbicia.

Za każdym razem port zasilano napięciem 1 V. Po drugiej stronie linii paskowej zastosowano Uniform Lumped Port z podłączonym jedynie obciążeniem 337Ω , symulujący opisane we wstępie rezystory obciążające linię.

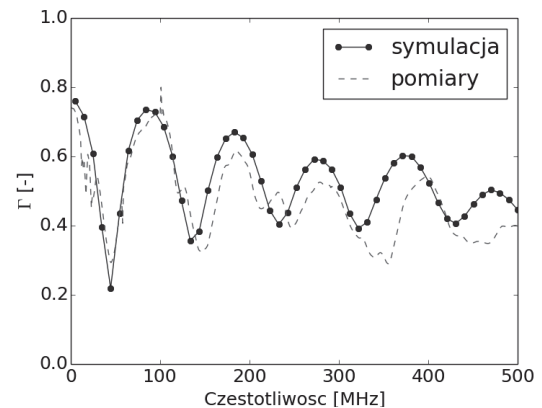
Wyniki badań

W celu weryfikacji modelu wykonano symulacje pola elektromagnetycznego (moduł RF programu COMSOL) w dziedzinie częstotliwości, w przedziale od 1 do 500 MHz. Przedział ten jest szerszy niż typowy zakres wykorzystania linii paskowych (ale węższy niż pożądany zakres badań projektowych). Został on dobrany tak właśnie, aby z jednej strony lepiej zweryfikować model i zbadać możliwość wykorzystania linii w szerszym niż nominalny zakresie częstotliwości, ale z drugiej – ograniczyć złożoność



Rys. 5. Wyniki symulacji dla dwóch różnych modeli zasilania. Wyniki pomiarów zostały przedstawione za pomocą ciągłego przebiegu.

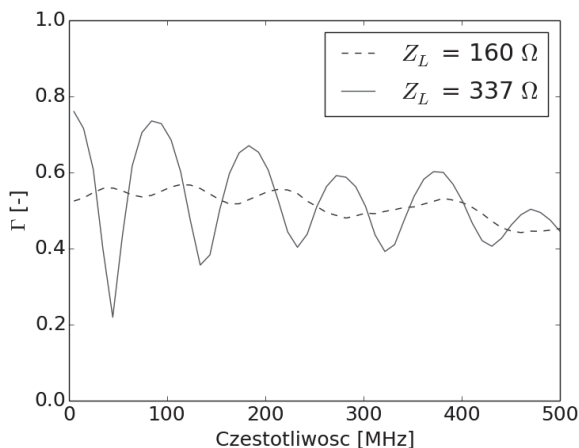
obliczeniową (a tym samym czas trwania symulacji). Porównanie z pomiarami wykonanymi wektorowym analizatorem obwodów przedstawiono na Rys. 6. Jak można zaobserwować, zarówno model numeryczny jak i rzeczywista struktura charakteryzują się bardzo podobnym przebiegiem zmian współczynnika odbicia w rozpatrywanym zakresie częstotliwości. Widać również, że wraz ze wzrostem częstotliwości rozbieżności pomiędzy symulacją, a pomiarami się powiększają.



Rys. 6. Porównanie współczynnika odbicia wyznaczonego na podstawie symulacji i wyznaczonego za pomocą analizatora R&S ZVRE

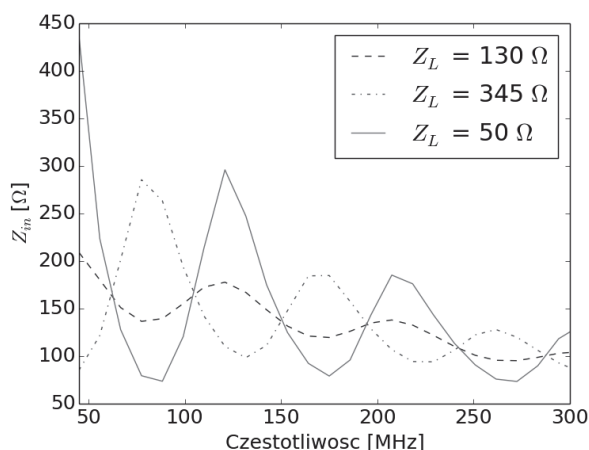
Aby zbadać przyczyny tego stanu rzeczy wykonano porównanie charakterystyk odbicia linii paskowej dla zmienionej impedancji obciążenia. Rys. 7 przedstawia wpływ zmniejszenia impedancji od strony obciążenia do wartości 160Ω . Łatwo daje się tam zauważyć istotną poprawę dopasowania linii do zasilania: w całym badanym przedziale częstotliwości współczynnik odbicia jest mniejszy niż 60%. Zwiększające się rozbieżności pomiędzy symulacją, a pomiarami w zakresie $f > 300$ MHz zauważone na Rys. 6, można wytłumaczyć niedoskonałością użytych rezystorów – przy wyższych częstotliwościach daje o sobie znać ich wewnętrzna pojemność.

Przedstawione wyżej eksperymenty pozwoliły przewidzieć, że charakterystykę badanej linii paskowej można łatwo poprawić zmieniając rezystancję obciążającą. Dla weryfikacji tego przypuszczenia wykonano najpierw szereg symulacji z różnymi wartościami rezystancji obciążającej linię – trzy wybrane charakterystyki pokazano na Rys. 8. W wyniku tych symulacji stwierdzono, że optymalna wartość rezystancji obciążającej istniejącą linię to $120\text{--}130 \Omega$. Pozwoli ona dopasować linię do generatora



Rys. 7. Charakterystyka odbicia oryginalnej (linia ciągła) i poprawionej (przerwana) linii paskowej

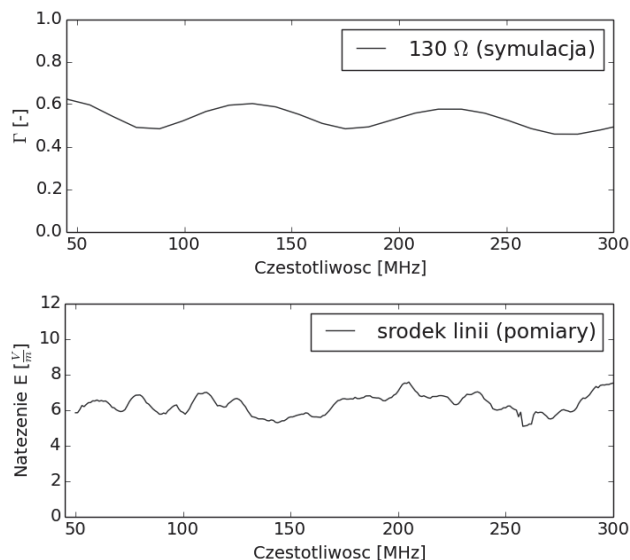
sygnałowego o wyjściowej impedancji 50Ω z dużym, ale stosunkowo stabilnym współczynnikiem odbicia. Dalsza poprawa dopasowania przy niezmiennych wymiarach linii jest możliwa przez zastosowanie transformatora dopasowującego o przekładni $50 \Omega/150 \Omega$.



Rys. 8. Porównanie impedancji widzianej na wejściowym przyłączy linii dla różnych rezystancji obciążenia

Kolejnym krokiem badań była zmiana rezystancji obciążającej linię na wartość 125Ω i wykonanie pomiarów pola elektromagnetycznego wewnątrz linii zasilanej możliwie stałym co do amplitudy sygnałem w zakresie częstotliwości od 1 MHz do 1 GHz. Badania przeprowadzono w laboratorium firmy ASTAT. Do zasilania linii użyto generatora sygnałowego TESEQ NSG 4070B-45 (z bardzo dużym zapasem mocy) ustawionego na moc wyjściową 26 dBmW podłączonego do linii poprzez tłumik o nominalnej tłumienności 6 dB. Zmierzona tłumienność toru zasilającego zmieniła się w zakresie od około 6 dB dla 1 MHz do nieco ponad 8.5 dB dla 1 GHz. Pomiarów pola wewnątrz linii dokonano za pomocą zasilanej laserowo trójosiowej sondy ETS-Lindgren HI-6122.

Rys. 9 przedstawia porównanie wyznaczonego na drodze symulacji komputerowej współczynnika odbicia i zmierzonego wewnątrz linii pola elektrycznego, przeliczonego do podawanej na wejście linii mocy 20 dBmW. Można zauważyć, że przy niezmiennym (w sensie mocy) w dziedzinie częstotliwości zasilaniu linii otrzymujemy wewnątrz niej tylko nieznacznie zmienne (w dziedzinie częstotliwości) pole elektromagnetyczne, co zdaje się



Rys. 9. Porównanie współczynnika odbicia wyznaczonego na drodze symulacji komputerowej i natężenia pola elektrycznego w środku pola pomiarowego

potwierdzać hipotezę, że współczynnik odbicia mocy jest także dość stabilny, a nie mocno zmienny, jak pokazana na Rys. 7 charakterystyka linii przed modyfikacją. Najbardziej jaskrawą ilustracją tego spostrzeżenia jest brak na dolnym wykresie Rys. 9 maksimum w okolicach 50 MHz, gdzie współczynnik odbicia pierwotnej linii (Rys. 7) wynosił tylko 0.2 przy wartości bliskiej 0.75 dla 100 MHz. Po modyfikacji wartości współczynnika odbicia i amplitudy pola E dla częstotliwości 50 i 100 MHz są zbliżone (Rys. 9).

Wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na prostą, ale skuteczną poprawę konstrukcji istniejącej linii paskowej przez lepsze dopasowanie impedancji obciążenia. Dzięki temu zabiegowi udało się uzyskać większe użyteczne natężenie pola elektromagnetycznego przy danych parametrach układu zasilającego.

LITERATURA

- [1] S. Deng, et al, "Mode Suppressed TEM Cell Design For High Frequency IC Measurements," EMC 2007, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, doi: 10.1109/ISEMC.2007.13, 2007.
- [2] M. Golio and B. Raton, The RF and Microwave Handbook. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2001.
- [3] S. Hilavin and A. Kustepeli, "Design and Implementation of a TEM Stripline for EMC Testing," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 56, no. 1, pp. 23–27, 2014.
- [4] J. Kuveda and R. K. Libla, "Determination of frequency range limit when using stripline as emission or immunity test methods," in Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat., Aug. 2006, vol. 3, pp. 823–828.
- [5] B. E. Roseberry and R. B. Schulz, "A parallel-stripline for testing of RF susceptibility," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 7, no. 2, pp. 142–150, Jun. 1965.
- [6] OIML R 76-1, 2006, Nonautomatic weighing instruments. Part 1: Metrological and technical requirements - Tests, 2006.
- [7] Sound and Television Broadcast Receivers and Associated Equipment—Immunity Characteristics—Limits and Methods of Measurement Specification, CENELEC Standard EN 55020, 2007.

Autorzy: mgr inż. Bartosz Chaber, dr hab. inż. Jacek Starzyński, Institute of Theory of Electrical Engineering, Measurement and Information Systems, Faculty of Electrical Engineering, Warsaw University of Technology, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Poland, email: jstar@ee.pw.edu.pl