

Przemysław Łopato, Michał Herbko*
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Monitorowanie naprężeń w elementach konstrukcyjnych za pomocą czujnika mikropaskowego

Strain monitoring in structural elements by microstrip sensor

ABSTRACT

In this work, a numerical analysis of circular microstrip sensors to assess deformation of materials and indirectly strain is presented. In this type of sensors, the reflection coefficient S_{11} is measured to determine strain value. Reflection coefficient represents the ratio of the power of reflected signal to the power of input signal. The coefficient is measured in frequency domain. The shift of resonant frequency caused by deformation of resonator is used to evaluate the strain value. This kind of transducer can be alternative to a strain gauge. In this article, the sensitivity of transducers made on laminates with different permittivity was evaluated.

Keywords: strain sensor, microstrip sensor, microwave technique, SHM, nondestructive testing

STRESZCZENIE

W niniejszej pracy przedstawiono analizę numeryczną przetworników mikropaskowych z kołowymi promiennikami do badania odkształceń materiałów i pośrednio naprężeń w nich występujących. W przypadku tego rodzaju czujników odkształcenie wyznaczone jest poprzez pomiar współczynnika odbicia S_{11} , który reprezentuje stosunek mocy sygnału odbitego do mocy sygnału wejściowego. Pomiar dokonywany jest w dziedzinie częstotliwości. Do oceny wartości odkształcenia wykorzystywane jest przesunięcie częstotliwości rezonansowej wywołane zmianą geometrii rezonatora. Zaproponowane w pracy przetworniki mogą być alternatywą dla czujników tensometrycznych. W tym artykule zbadano czułość przetworników wykonanych na laminatach o różnej przenikalności elektrycznej.

Słowa kluczowe: czujnik naprężeń, czujnik mikropaskowy, technika mikrofalowa, SHM, badania nieniszczące

1. Wstęp

Technika Structural Health Monitoring (SHM) stosowana jest do monitorowania stanu m.in.: samolotów, pojazdów kosmicznych, tam, drapaczy chmur czy mostów. Systemy SHM coraz częściej zastępują lub wspomagają tradycyjne sposoby kontroli stanu konstrukcji, ponieważ zmniejszają koszty utrzymania, dają odpowiedź o stanie obiektu po wystąpieniu gwałtownych anomalii pogodowych, takich jak trzęsienia ziemi, huragany czy intensywne opady śniegu, dostarczają informacji, które mogą być użyteczne przy projektowaniu nowszych struktur, a w przypadku samolotów umożliwiają skrócenie czasu postoju oraz serwisowania [1-2]. Niezwykle ważnym elementem systemów SHM jest sieć czujników. W przypadku systemów do monitorowania stanu konstrukcji mostów około 50% wszystkich czujników stanowią elementy do pomiaru naprężeń [1]. Dotychczas do pomiaru wartości naprężeń wykorzystywane były: tensometry, czujniki światłowodowe, piezoelektryczne oraz magnetyczne [3-6].

Niedawno pojawił się w literaturze pomysł wykorzystania anten mikropaskowych do pomiaru odkształceń i pośrednio naprężeń [7-14]. Proponowany w pracy czujnik składa się z substratu dielektrycznego, na który z jednej strony została naniesiona płaszczyzna masy, a z drugiej promiennik oraz linia mikropaskowa. Czujnik przyklejany jest do elementu badanego. Odkształcenie powoduje zmianę wymiarów promiennika (rezonatora), co wpływa na zmianę rozkładu gęstości prądu w promienniku. Stopień odkształcenia

oceniany jest poprzez pomiar współczynnika odbicia S_{11} , który reprezentuje stosunek mocy sygnału odbitego do mocy sygnału wejściowego. Pomiar jest wykonywany w dziedzinie częstotliwości za pomocą analizatora. Do oceny wartości odkształcenia wykorzystywane jest przesunięcie częstotliwości rezonansowej wywołane zmianą geometrii rezonatora. Do tej pory najczęściej badane były przetworniki z prostokątnymi promiennikami [7-10]. Jednak rozwój mikropaskowych czujników naprężeń nie zatrzymał się na wykorzystaniu jedynie przetworników z prostokątnymi promiennikami, zbadane zostały również przetworniki z promiennikami o innych kształtach, które charakteryzują się ciekawymi właściwościami kierunkowymi [11-14]. W szczególności należy zwrócić uwagę na pracę [11], w której autorzy wykazali możliwość wykorzystania jednego czujnika do równoczesnego pomiaru kąta oraz wartości naprężenia. Do pomiaru tych parametrów zastosowano zmiany dwóch częstotliwości rezonansowych, przy których występują różne rozkłady gęstości prądu w kołowym promienniku, a tym samym inne czułości przetwornika na odkształcenia działające w różnych kierunkach. Kolejną zaletą jest możliwość pomiaru naprężeń za pomocą przetworników mikropaskowych bezprzewodowo, co zostało pokazane w [14].

W niniejszej pracy zbadano czułość przetworników wykonanych na substratach o różnej wartości przenikalności elektrycznej, co nie zostało wcześniej przedstawione w literaturze. W tym celu zaprojektowano szereg przetworników mikropaskowych z kołowymi promiennikami i przeprowadzono analizy numeryczne.

*Autor korespondencyjny. E-mail: michal.herbko@zut.edu.pl

2. Projekt czujnika

W pracy zaprojektowano czujniki na laminacie o grubości $h = 0,5$ mm na częstotliwość operacyjną $f_r = 2,5$ GHz. Promień czujnika został obliczony z następującej zależności [15]:

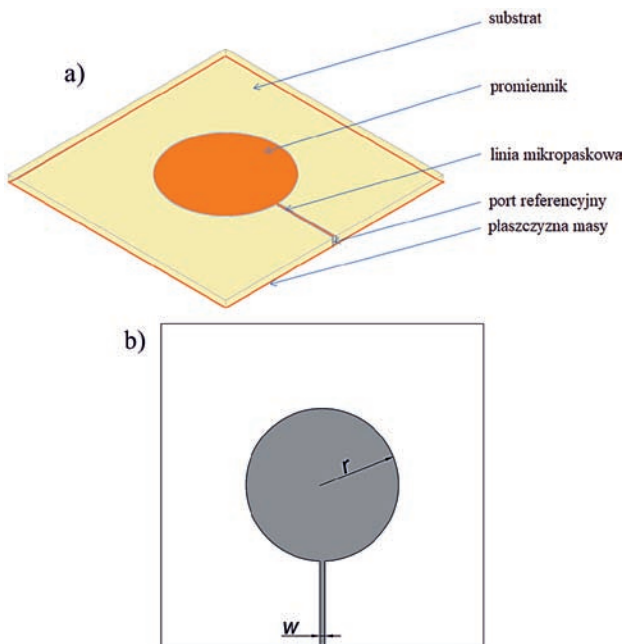
$$r = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1,7726 \right] \right\}^2} \quad (1)$$

gdzie:

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

r – promień promiennika, ϵ_r – względna przenikalność elektryczna laminatu, f_r – częstotliwość rezonansowa, h – grubość laminatu.

Natomiast szerokość linii mikropaskowej została wyznaczona przy pomocy modelu opisanego w [16]. Projekt czujnika został pokazany na rysunku 1, a dokładne wymiary zaprojektowanych czujników zostały przedstawione w tabeli 1. Na podstawie przedstawionych wymiarów zaprojektowanych przetworników, można zauważyć, że wraz ze wzrostem ϵ_r maleje długość promienia rezonatora r , jak i szerokość ich linii transmisyjnych w doprowadzających sygnał do promiennika.



Rys. 1. Zaproponowany czujnik; a) rysunek ogólny czujnika mikropaskowego, b) projekt czujnika.

Fig. 1. Proposed sensor; a) general figure of microstrip sensor, b) sensor design.

Tab. 1. Wymiary czujników.

Tab. 1. Sensors dimensions.

ϵ_r	r [mm]	w [mm]
2,2	23,7	1,541
4,4	16,76	0,956
6,6	13,685	0,751
8,8	11,852	0,588
11	10,601	0,435
13,2	9,677	0,359

3. Analiza numeryczna

Dokonano analizy numerycznej zaproponowanych w pracy czujników. W tym celu wykorzystana została metoda elementów skończonych. Model numeryczny oraz obliczenia zostały wykonane w środowisku Comsol Multiphysics. W opracowanym modelu numerycznym zaprojektowany przetwornik przyklejony jest do blachy konstrukcyjnej S355J2+N, aby odwzorować rzeczywiste warunki, w jakich może być użyty. Z drugiej strony blachy, którą obciążano umieszczono taki sam substrat, z jakiego wykonany został czujnik, aby uniknąć wygięcia blachy, do której przytwierdzony jest badany przetwornik (Rys. 2). Podczas przeprowadzanej analizy numerycznej, najpierw blacha wraz z zaprojektowanym czujnikiem została odkształcona za pomocą modułu mechanicznego (Solid Mechanics). Następnie wykorzystany został moduł do analizy pola elektromagnetycznego wysokich częstotliwości (RF module) w celu wyznaczenia częstotliwości rezonansowych przetwornika przy zadanym naprężeniu. Podczas obliczeń wykorzystywane były następujące równania:

$$0 = \nabla \cdot S + F_V \quad (3)$$

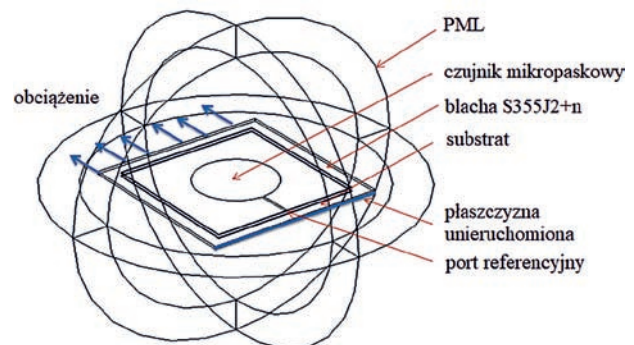
$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma_e}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0 \quad (4)$$

gdzie: S – naprężenie, F_V – siła na jednostkę objętości, μ_r – względna przenikalność magnetyczna, E – pole elektryczne, k_0 – kątowna liczba falowa, ϵ_r – względna przenikalność elektryczna, σ_e – konduktywność elektryczna, ω – pulsacja.

W przeprowadzonej analizie numerycznej mierzono częstotliwość rezonansową dla naprężenia równego 0 oraz 350 MPa, ponieważ dotychczas w literaturze została wyznaczona ściśle liniowa zależność zmian częstotliwości Δf_r od stopnia odkształcenia monitorowanego elementu.

$$\Delta f_r = f_{rxMPa} - f_{r0MPa} \quad (5)$$

gdzie: f_{rxMPa} – częstotliwość rezonansowa przy naprężeniu x MPa, f_{r0MPa} – częstotliwość rezonansowa przy naprężeniu 0 MPa.

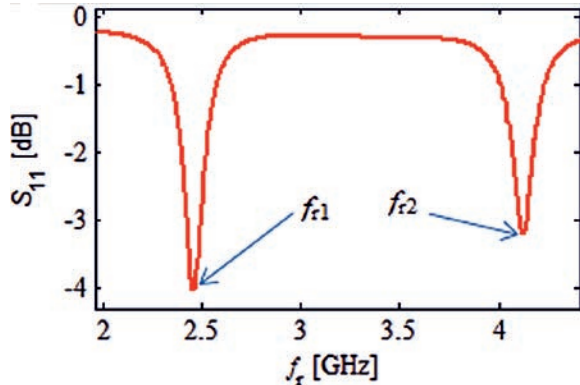


Rys. 2. Model numeryczny.

Fig. 2. Numerical model.

W tym artykule zdecydowano się przeanalizować zmiany Δf_r dla dwóch pierwszych częstotliwości rezonansowych występujących dla promiennika kołowego. Na rysunku 3 został przedstawiony obliczony współczynnik odbicia S_{11} dla przetwornika zaprojektowanego na laminacie o względnej

przenikalności elektrycznej $\epsilon_r = 4,4$. Natomiast w tabeli 2. pokazano zmiany częstotliwości rezonansowych dla czujników zaprojektowanych z wykorzystaniem różnych laminatów. Otrzymane wyniki z eksperymentu numerycznego pokazują nieznaczną zmianę czułości przetworników wykonanych na laminatach o różnej przenikalności elektrycznej.



Rys. 3. Obliczony współczynnik odbicia S_{11} dla $\epsilon_r = 4.4$.
Fig. 3. Calculated reflection coefficient S_{11} for $\epsilon_r = 4.4$.

Tab. 2. Przesunięcie częstotliwości rezonansowych.
Tab. 2. Shift of resonant frequencies.

ϵ_r	Δf_{r1} [MHz]	Δf_{r2} [MHz]
2,2	-3,85	-2,14
4,4	-3,79	-2,09
6,6	-3,76	-2,38
8,8	-3,73	-2,29
11	-3,73	-2,28
13,2	-3,64	-2,28

4. Podsumowanie

Wyniki z wykonanej analizy numerycznej wykazują zbliżone czułości przetworników z kołowymi promiennikami wykonanych na laminatach o różnej przenikalności elektrycznej. Dla pierwszej częstotliwości rezonansowej Δf_{r1} zmienia się maksymalnie o 5,8%, natomiast w przypadku drugiej częstotliwości rezonansowej zmiana Δf_{r2} wynosi co najwyżej 10%. Należy jednak zwrócić uwagę na znaczne różnice w wielkości przetworników wykonanych na różnych laminatach. Im większa jest względna przenikalność elektryczna substratu, na którym został wykonany przetwornik, tym mniejsze są jego wymiary. Długość promienia promiennika czujnika wykonanego na laminacie o względnej przenikalności elektrycznej $\epsilon_r = 2,2$ wynosi 23,7 mm, natomiast dla $\epsilon_r = 13,2$ promień promiennika wynosi 9,677 mm. Wyniki przeprowadzonej analizy numerycznej pozwalają stwierdzić, że możliwa i celowa jest miniaturyzacja przetworników mikropaskowych do pomiaru naprężeń.

5. Literatura

- [1] G,Capellari, E,Chatzi,S,Mariani, "Cost-Benefit Optimization of Structural Health Monitoring Sensor Networks," *Sensor*, 18(7),2174, 2018,
- [2] Y,Q, Ni, K,Y, Wong, "Integrating Bridge Structural Health Monitoring and Condition-Based Maintenance Management," 4th International Workshop on Civil Structural Health Monitoring, 2012 Nov 6-8, Berlin, Germany,
- [3] J, Manojlović, P, Janković, "Bridge measuring circuits in the strain gauge sensor configuration" *Mechanical Engineering*, 2013, 11(1), pp, 75-84,
- [4] D, Betz, Thursby G,J,, Culshaw B,, Staszewski W,J,, "Advanced of a fibres Bragg grating strain gauge rosette," *Journal of Lightwave Technology*, 24(2), pp, 1019-1026,
- [5] J, Sirohi, I, Chopra, "Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000, 11(4), pp,246-257,
- [6] G, Psuj, T,Chady, M,Enokizono, T,Todaka, "Stress evaluation in nonoriented electrical steel samples by observation of vector magnetic flux under static and rotating field conditions," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2014, 44(3,4), pp, 339-347,
- [7] U, Tata, H, Huang, R,L, Carter, Chiao J,C,, "Exploiting a patch antenna for strain measurements," *Measurement Science and Technology*, vol, 20 pp, 1-7, 2009,
- [8] A, Benchirouf, R, Zichner, C, Muller, O, Kanoun, "Electromagnetic Simulation of Flexible Strain Sensor based Microstrip Patch Antenna," *International Journal of Microwave and Optical Technology*, vol 6-I, pp,397-401, 2015,
- [9]] W, Wang, H, Ge, T, Liu T,, Liu M,, "Study of Patch Antennas for Strain Measurement," *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVIII)*, 40:313-321, 2015,
- [10] P, Lopato, M, Herbko, "Microwave Structural Health Monitoring Sensor for Deformation Measurement of Bended Steel Structures: Influence of Curvature Effect," *Radioengineering*, 26(4), pp, 1060-1066, 2017,
- [11] P, Lopato, M, Herbko, "A Circular Microstrip Antenna Sensor for Direction Sensitive Strain Evaluation," *Sensors*, 18(1), 310, 2018,
- [12] A,Daliri, A,Galehdar, W,S,T,Rowe, K,Ghorbani, S,John, "Utilising microstrip patch antenna strain sensors for structural health monitoring," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(2), 2012,
- [13] A,Daliri, A,Galehdar, S,John, W, S,T, Rowe, K, Ghorbani, "Slotted circular microstrip patch antenna application in strain based structural health monitoring," *AIAC14 Fourteenth Australian International Aerospace Congress*, Melbourne, Australia, 28 February–3 March 2011,
- [14] A,Daliri, A,Galehdar, W,S,T,Rowe, S,John, C,H,Wang, K,Ghorbani, "Quality factor effect on the wireless range of microstrip patch antenna strain sensors," *Sensor*, 14(1), pp, 595-605, 2014,
- [15] C,A, Balanis, "Antenna theory, third edition," John Wiley & Sons, Hoboken, 2005,
- [16] J.A.Dobrowolski "Technika Wielkich Częstotliwości," Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2011.