

## Mikrofalowy czujnik do monitorowania kierunku oraz wartości naprężeń

Przedmiotem wynalazku jest mikrofalowy czujnik do monitorowania kierunku oraz wartości naprężeń elementów konstrukcyjnych.

W monitorowaniu stanu elementów konstrukcyjnych nie zawsze znany jest dokładny kierunek naprężenia. Problem ten rozwiązywany jest między innymi poprzez zastosowanie rozet tensometrycznych składających się z kilku tensometrów lub poprzez zastosowanie jednego mikrofalowego czujnika naprężeń.

Z publikacji U.Tata, H.Huang, R.L. Carter, J.C. Chiao „Exploiting a patch antenna for strain measurements”(Measurement Science and Technology 20(2009), IOP Publishing) znana jest antena mikropaskowa z promiennikiem prostokątnym, która jest wykorzystywana do pomiaru odkształceń w kierunku prostopadłym oraz równoległym do osi promiennika. Monitorowanie stanu naprężenia dokonuje się poprzez pomiar wartości dwóch pierwszych częstotliwości rezonansowych. Przy pierwszej częstotliwości rezonansowej prąd w promienniku płynie równoległe do osi promiennika, a w przypadku drugiej częstotliwości rezonansowej prąd płynie prostopadle do osi promiennika. Taki rozkład prądów w promienniku umożliwia jednoczesny pomiar kierunku oraz wartości naprężenia. Wadą tego rozwiązania jest istotna różnica czułości obu częstotliwości rezonansowych.

Znany z opisu wynalazku US2011040498 jest pasywny czujnik antenowy do pomiaru naprężeń, temperatury, pęknięć oraz zmian zmęczenia. Czujnik składa się z substratu na który z jednej strony naniesiony jest prostokątny promiennik anteny, a z drugiej strony płaszczyzna masy. W przypadku monitorowania stanu pęknięć, w elementach przewodzących, płaszczyzna masy jest pomijana. A jej rolę pełni płaszczyzna badana. Czujnik ten jest zasilany w sposób bezprzewodowy.

Znane z opisu wynalazku US2014230563 są dwie anteny mikropaskowe. Pierwsza z nich składa się z substratu, na który z jednej strony naniesiony jest prostokątny promiennik, a z drugiej strony płaszczyzna masy, w której wycięty został pod promiennikiem prostokąt. Czujnik ten służy do pomiaru sił ścinających. Druga antena mikropaskowa z promiennikiem w kształcie pętli służy do pomiaru ciśnienia.

Znany z opisu rozwiązania CN103954263 jest antenowy czujnik do bezprzewodowego pomiaru naprężeń. Czujnik ten składa się z dielektryka na który z jednej strony

naniesiony jest promiennik w kształcie dipola, a z drugiej naniesiona została płaszczyzna masy.

Znany z publikacji A.Daliri, A.Galehdar, S. John, W.S.T. Rowe, K Ghorbani „Slotted Circular Microstrip Patch Antenna Application Strain Based Structural Health Monitoring” (AIAC14 Fourteenth Australian International Aerospace Congress) jest przetwornik z promiennikiem w kształcie koła z wyciętym na środku prostokątem. Czujnik ten zasilany jest współosiowo, co w wielu przypadkach wymusza wycięcie w badanym elemencie otworu.

Znana z publikacji A.Daliri, S.John, A.Galehdar, W.S.T.Rowe, K.Ghorbani „Strain measurement in composite materials using microstrip patch antennas” (Proceedings of ASME 2010 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems SMASIS 2010, September 28-October, 2010, Philadelphia, Pennsylvania, USA) jest antena mikropaskowa z kołowym promiennikiem do badania naprężeń. Antena zasilana jest w sposób współosiowy.

Znana z publikacji A.Daliri, C.H. Wang, S.John, A.Galehdar, W.S.T.Rowe, K.Ghorbani “Multidirectional circular microstrip patch antenna strain sensor” (Proceedings of the ASME 2011 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems SMASIS 2011, September 18-21,2011, Phoenix, Arizona, USA) jest antena do pomiaru naprężeń z promiennikiem w kształcie koła z wyciętymi prostokątami. Przetwornik ten zasilany jest współosiowo.

Mikrofalowy czujnik do monitorowania kierunku oraz wartości naprężeń, według wynalazku, wyposażony w umieszczone na podłożu dielektrycznym promiennik i masę oraz złącze sygnałowe, charakteryzuje się tym, że ma dwa promienniki rozmieszczone względem siebie pod kątem od  $60^\circ$  do  $120^\circ$  o częstotliwościach rezonansowych różniących się od siebie o nie więcej niż 30% i zasilanych za pomocą mikrofalowego dzielnika mocy. Promienniki powinny być zaprojektowane na podstawowy rodzaj rezonansowy. Promienniki mogą być dowolnego kształtu np. prostokątny, trójkątny, kołowy, pierścieniowy. Dzielnik może być w postaci np. dzielnika Wilkinsona i służy do dzielenia dostarczanej do nich mocy fali elektromagnetycznej. Częstotliwości rezonansowe promienników powinny być możliwie bliskie sobie, jednak w wynalazku wymagane jest, aby na charakterystyce współczynnika  $S_{11}$  widoczne były dwa rezonanse.

Korzystnie promienniki rozmieszczone są względem siebie pod kątem  $90^\circ$ . Rozmieszczenie promienników względem siebie pod kątem  $90^\circ$  umożliwia uzyskanie najwyższej czułości przy pomiarze kierunku oraz wartości naprężenia.

Korzystnie promienniki są zasilane przez dzielnik z taką samą mocą. Podział po równo mocy sygnału pozwala uzyskać zbliżone wartości amplitud współczynnika odbicia dla obu rezonansów.

Dzielnik Wilkinsona ma zamontowany powierzchniowo rezystor.

Złącze sygnałowe stanowi złącze SMA.

Dzielnik połączony jest ze złączem sygnałowym mikropaskową linią transmisyjną.

Mikrofalowy czujnik wykonuje się w sposób taki sam jak płytki PCB, należy jednak zwrócić szczególną uwagę na dużą dokładność w wykonaniu, od której zależy jakość otrzymanych sygnałów.

Zaletą rozwiązania jest to, że pierwsze dwie częstotliwości rezonansowe mają zbliżone wartości, co umożliwia zmniejszenie częstotliwościowego zakresu pomiarowego, a tym samym zmniejszenie kroku z jakim wykonuje się pomiar, co przyczynia się do zwiększenia czułości. Zmniejszenie zakresu pomiarowego pozwala na zmniejszenie liczby punktów pomiarowych więc pośrednio skraca czas pomiaru. Zastosowanie dwóch promienników o zbliżonej częstotliwości rezonansowej umożliwia uzyskanie wyższej czułości mikrofalowego czujnika, od czułości pojedynczego czujnika z prostokątnym promiennikiem, w którym pierwsze dwie częstotliwości rezonansowe są bardziej oddalone od siebie. Wynika to z większej czułości czujników mikropaskowych pracujących na wyższych częstotliwościach oraz ograniczeń maksymalnej częstotliwości wektorowego analizatora sieci. Cena wektorowych analizatorów sieci zależy w znacznym stopniu od ich częstotliwości maksymalnej (im wyższa tym analizator jest droższy). Rozwiązanie według wynalazku pozwala zaprojektować czujnik na częstotliwości zbliżone do wartości maksymalnej wektorowego analizatora sieci, który będzie używany podczas pomiarów. Umożliwi to uzyskanie maksymalnej czułości przy pomiarze wartości oraz kierunku naprężenia.

Wynalazek został przedstawiony w przykładzie wykonania i na rysunku, na którym Fig.1 przedstawia mikrofalowy czujnik w widoku z góry, Fig. 2 przedstawia mikrofalowy czujnik w widoku z dołu, Fig. 3 przedstawia charakterystykę współczynnika odbicia  $S_{11}$  mikrofalowego czujnika według przykładu.

Mikrofalowy czujnik ma dwa promienniki 1, 1' umieszczone na dielektrycznym podłożu 2. Za pomocą modelu analitycznego linii transmisyjnej (albo za pomocą modelu wężkowego, metody elementów skończonych lub metody różnic skończonych) dwa prostokątne promienniki 1, 1' projektuje się na częstotliwość  $f_{r1} = 3,654\text{GHz}$  oraz  $f_{r2} = 3,842\text{GHz}$  na podłożu dielektrycznym 2- laminacie FR4 o względnej przenikalności elektrycznej ( $\epsilon_r = 4,4$ ) i grubości ( $d = 0,5\text{mm}$ ). Promienniki 1, 1' rozmieszczone są względem siebie pod kątem  $90^\circ$  i połączone są z dzielnikiem 3, który je zasila. Dzielnik 3 (Wilkinsona) jest zaprojektowany na pośrednią wartość częstotliwości pracy obu promienników 1, 1' (równą wartości średniej arytmetycznej częstotliwości). Dzielnik 3 połączony jest ze złączem sygnałowym 4 (złącze SMA  $50\ \Omega$ ) za pośrednictwem mikropaskowej linii transmisyjnej 5. Promienniki posiadają wcięcia dopasowujące impedancje promiennika do mikropaskowej linii transmisyjnej 5. Po przeciwnej stronie podłoża dielektrycznego 2 czujnik ma płaszczyznę masy 6. W dzielniku 3 wykorzystany został rezystor (nieuwidoczny na rysunku) montowany powierzchniowo o wartości rezystancji  $100\ \Omega$ .

Mikrofalowy czujnik przykleja się do elementu badanego. Pomiar odkształceń i pośrednio naprężeń wykonuje się za pomocą wektorowego analizatora sieci, który umożliwia badanie charakterystyki współczynnika odbicia  $S_{11}$ . Pomiar odkształceń i pośrednio naprężeń dokonuje się poprzez monitorowanie wartości częstotliwości rezonansowych promienników 1, 1', które odpowiadają minimum lokalnym charakterystyki współczynnika odbicia. Zmiany częstotliwości rezonansowych zależą od kierunku rozptywu prądu w promiennikach 1, 1' przy danym rezonansie. Prądy w mikrofalowym czujniku płyną przy dwóch pierwszych częstotliwościach rezonansowych równolegle do osi promienników 1, 1' (w promienniku 1 o niższej częstotliwości rezonansowej przy pierwszym rezonansie, a w promienniku 1' o wyższej częstotliwości rezonansowej przy drugiej częstotliwości rezonansowej). Dlatego w przypadku siły działającej równolegle do osi promiennika 1 (pracującego na niższej częstotliwości rezonansowej) wartość pierwszej częstotliwości rezonansowej mikrofalowego czujnika do monitorowania kierunku oraz wartości naprężeń zmaleje, a drugiej wzrośnie. W przypadku sił działających równolegle do osi promiennika 1' (o wyższej częstotliwości rezonansowej) występuje sytuacja odwrotna – wzrost pierwszej częstotliwości rezonansowej oraz spadek drugiej.