

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **217993**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **390193**

(51) Int.Cl.
G01N 27/00 (2006.01)
G01M 99/00 (2011.01)

(22) Data zgłoszenia: **28.01.2010**

(54) **Sposób monitorowania uszkodzeń w elementach konstrukcji
i czujnik uszkodzeń w elementach konstrukcji**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
01.08.2011 BUP 16/11

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
30.09.2014 WUP 09/14

(73) Uprawniony z patentu:
**ADAPTRONICA SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ
ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ, Łomianki, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:
MAREK KOKOT, Warszawa, PL
JAN HOLNICKI-SZULC, Warszawa, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Anna Bełz
rzecz. pat. Janusz Żurek

PL 217993 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób monitorowania uszkodzeń w elementach konstrukcji za pomocą układu elektrycznego i czujnik uszkodzeń w elementach konstrukcji.

Znane są systemy, które pozwalają monitorować stan urządzeń lub konstrukcji (lub ich wybranych elementów) w sposób ciągły, także w trakcie ich normalnej eksploatacji. Systemy te zawierają układy pomiarowe wbudowane lub trwale połączone z elementami badanej konstrukcji. Rozwiązania technologiczne, które znalazły najszersze zastosowanie w zintegrowanych układach pomiarowych to przetworniki piezoelektryczne oraz światłowody. Elementy piezoelektryczne pełnią rolę zarówno wzbudników fal mechanicznych jak i lokalnych sensorów deformacji. Włókna światłowodowe, zawierające siatki Bragga lub skonfigurowane w układy interferometryczne, pełnią rolę czujników odkształceń. Systemy o zintegrowanych układach pomiarowych bazują na metodach wibracyjnych i propagacji fal. tzn. identyfikacja defektów odbywa się na drodze analizy zmian w dynamicznej odpowiedzi konstrukcji na zadane wymuszenie mechaniczne (odpowiedź konstrukcji „zdrowej” jest różna od odpowiedzi konstrukcji uszkodzonej).

Znane są również rozwiązania systemów monitorowania, w których rolę zintegrowanych czujników uszkodzeń pełnią układy elektryczne. Działanie systemów tego typu jest oparte na założeniu, że lokalne defekty lub deformacje w elementach konstrukcji wywołują zmiany parametrów elektrycznych (rezystancji, pojemności, impedancji) w zintegrowanym układzie elektrycznym. Monitorowanie stanu konstrukcji sprowadza się do zadania monitorowania zmian parametrów i ich lokalizacji w strukturze zespolonego układu elektrycznego. Z opisu patentowego US 5.184,516 znany jest układ czujników w postaci elastycznego obwodu drukowanego, przytwierdzanego do powierzchni badanego elementu konstrukcji, który zawiera układy tensometrów oporowych do lokalnych pomiarów odkształceń oraz układy równoległych ścieżek przewodzących do wykrywania pęknięć powierzchniowych (uszkodzenie na powierzchni elementu powoduje przerwanie połączenia elektrycznego). W zgłoszeniu wynalazku US 2005/0284232 A1 opisano elektryczny system monitorowania w postaci prostopadłych, wzajemnie izolowanych ścieżek przewodzących, wykonanych na powierzchni badanego elementu. Identyfikacja defektu jest wynikiem pomiaru zmian przewodności w każdej ze ścieżek. W zgłoszeniu wynalazku US 2006/0254366 A1 podobna sieć prostopadłych ścieżek przewodzących, jednak wzajemnie połączonych w punktach przecięcia (tzw. „grid”), jest monitorowana poprzez badanie zmian rezystancji pomiędzy wybranymi końcówkami ścieżek. W celu lokalizacji defektu jest stosowany iteracyjny algorytm pozwalający zawęzić miejsce wystąpienia defektu do małego obszaru.

Zgodnie z wynalazkiem, na elemencie konstrukcyjnym lub wewnątrz jego struktury, który ma podlegać obserwacji mocuje się układ elektryczny zestawiony z elementów rezystancyjnych i pojemnościowych, o znanych parametrach elementów i ustalonej topologii połączeń. W układzie elektrycznym umieszcza się także grupę elementów rezystancyjnych, które nie ulegają uszkodzeniu mimo wystąpienia defektów w konstrukcji. Tak połączony z konstrukcją układ pobudza się w założonym przedziale czasu zmiennym sygnałem testowym, będącym złożeniem funkcji harmonicznej o częstotliwości z przedziału 1 Hz-10000 Hz oraz funkcji ograniczającej w postaci rozkładu Gaussa, funkcji trójkątnej lub funkcji harmonicznej o niższej częstotliwości. Jednocześnie, w tym samym przedziale czasu, rejestruje się odpowiedź układu w postaci dyskretnych przebiegów napięcia, mierzonych we wstępnie ustalonych węzłach pomiarowych. Odpowiedź układu, zmierzoną dla konstrukcji nieuszkodzonej czyli referencyjną, alternatywnie oblicza się na podstawie numerycznego modelu układu elektrycznego to znaczy, znając parametry elementów, topologię układu oraz kształt sygnału testowego, wyznacza się odpowiedź układu, stosując znane metody analizy obwodów elektrycznych (np. metodę potencjałów węzłowych). Ponadto, na podstawie modelu numerycznego układu, tworzy się zbiór wewnętrznych relacji w postaci macierzy wpływu, która jest podstawą algorytmu obliczeniowego w Metodzie Dystorsji Wirtualnych. Macierz ta jest zbiorem funkcji przejścia dla impulsowych wymuszeń prądowych przykładowych w elementach układu, w których zakłada się możliwość wystąpienia defektu.

W trakcie eksploatacji konstrukcji dokonuje się kontrolnych pobudeń układu tym samym, zmiennym sygnałem testowym. W przypadku wystąpienia defektów w konstrukcji, uszkodzeniu mogą ulegać elementy pojemnościowe lub część elementów rezystancyjnych, przy czym uszkodzenie elementu pojemnościowego powoduje spadek wartości pojemności elektrycznej, natomiast uszkodzenie elementu rezystancyjnego powoduje spadek wartości konduktancji. Zmiany parametrów układu elektrycznego na skutek wystąpienia defektów w konstrukcji powodują zmianę dynamicznej odpowiedzi układu na zadany sygnał testowy.

Algorytm identyfikacji zmian parametrów w układzie elementów rezystancyjnych i pojemnościowych bazuje na gradientowej optymalizacji, w którym funkcja celu jest sformułowana jako średniokwadratowa różnica pomiędzy aktualnie zmierzoną odpowiedzią układu a odpowiedzią referencyjną. Wielkościami poszukiwanymi w procesie identyfikacji są tak zwane dystorsje wirtualne, które w sposób jednoznaczny modelują wpływ modyfikacji parametrów na dynamiczną odpowiedź układu. Posługując się procedurami optymalizacji (np. metodą największego spadku gradientu) rozwiązuje się problem odwrotny lokalizacji dystorsji wirtualnych, które wskazują na uszkodzone elementy układu, a tym samym, na miejsca wystąpienia defektów w strukturze konstrukcji.

Zastosowanie dynamicznej metody pozwala zredukować liczbę punktów pomiarowych, co oznacza mniejszą ilość połączeń pomiędzy układem sieci czujników a układem pomiarowym.

Przedmiotem wynalazku jest także czujnik uszkodzeń elementów konstrukcyjnych, który ma postać układu elektrycznego zintegrowanego z konstrukcją na jej powierzchni lub wewnątrz struktury elementu konstrukcyjnego. Układ składa się z elementów rezystancyjnych, ulegających zniszczeniu na skutek powstających uszkodzeń mechanicznych w konstrukcji, elementów rezystancyjnych trwałych oraz elementów pojemnościowych, które także mogą ulegać uszkodzeniu na skutek defektów w konstrukcji.

Należy nadmienić, że elementy składowe układu elektrycznego mogą mieć niemal dowolną postać fizyczną i technologię wykonania, tzn. elementy rezystancyjne mogą mieć na przykład postać drutów oporowych, ścieżek przewodzących lub rezystorów dyskretnych, natomiast elementy pojemnościowe mogą mieć postać pokrywających się okładzin tworzących kondensator płaski lub kondensatorów dyskretnych.

Elementy rezystancyjne o budowie nietrwalej tworzą w układzie strukturę otwartą, to znaczy nie istnieje pętla dla przepływu prądu utworzona z tych elementów. Elementy o budowie trwałej są w układzie rozmieszczone tak, aby tworzyły co najmniej jedno alternatywne połączenie dla przepływu prądu pomiędzy węzłami układu, do których dołączone jest zasilanie. Elementy pojemnościowe są usytuowane tak, aby co najmniej jeden węzeł każdego elementu rezystancyjnego o budowie nietrwalej był połączony z elementem pojemnościowym.

Wynalazek w przykładach wykonania jest bliżej przedstawiony na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia przykładowy czujnik w postaci połączonych szeregowo klatek, a Fig. 2 inny przykład budowy czujnika.

P r z y k ł a d.

Zestawiono układ elektryczny w postaci szeregu dziesięciu klatek **1** o kształcie kwadratu, na którego bokach znajdują się elementy rezystancyjne **2** i **3**, zaś na przekątnej znajduje się element pojemnościowy **4**. Klatki **1** są połączone w ten sposób, że mają wspólny rezystor **2**. Część rezystorów **2** została wykonana jako elementy nietrwale, tzn. mogą one ulegać uszkodzeniu na skutek wystąpienia defektów w konstrukcji. Pozostałe elementy rezystancyjne **3** są elementami trwałymi. Rezystancja wszystkich elementów wynosi $10\text{ k}\Omega$, a pojemność elektryczna wynosi 100 nF . Układ został przytwierdzony do powierzchni badanego elementu konstrukcyjnego. Do skrajnego węzła **5** układu podłączono zasilanie, a do skrajnego węzła **6**, leżącego po przeciwnej stronie, uziemienie. Następnie pobudzono układ sygnałem testowym w postaci funkcji harmonicznej o częstotliwości 250 Hz i amplitudzie 10 V , ograniczonej funkcją trójkątną, o czasie trwania 10 ms , jednocześnie rejestrując odpowiedź referencyjną układu w postaci dyskretnych przebiegów napięcia w trzech wybranych węzłach układu. Na podstawie modelu numerycznego układu wyznaczono macierz wpływu, która zawiera odpowiedzi układu w wybranych węzłach pomiarowych dla jednostkowych impulsowych wymuszeń prądowych przyłożonych w miejscach spodziewanych wystąpień defektów konstrukcji, czyli dla rezystorów **2** i elementów pojemnościowych **4**. Otrzymano w ten sposób podstawę algorytmu obliczeniowego w Metodzie Dystorsji Wirtualnych. Następnie poddano element konstrukcyjny zmiennym obciążeniom, które doprowadziły do uszkodzenia struktury materiału konstrukcji, po czym dokonano ponownego pobudzenia układu elektrycznego takim samym sygnałem testowym jak uprzednio, doprowadzonym do tego samego węzła **5**. Wykorzystując wyznaczone wcześniej odpowiedzi referencyjne układu oraz macierz wpływu, wyznaczono, na drodze gradientowej optymalizacji, rozkład dystorsji wirtualnych modelujących powstały stan uszkodzeń w układzie elektrycznym. Następnie, na podstawie zlokalizowanych uszkodzeń elementów układu, określono geometryczne miejsce wystąpienia defektu w konstrukcji.

Układ pokazany na rysunku Fig. 1 utworzony jest z połączonych w szereg, dziesięciu klatek **1** w kształcie kwadratu, o bokach złożonych z elementów rezystancyjnych **2** i **3** oraz elemencie pojemnościowym **4** na przekątnej. W skład układu wchodzi elementy rezystancyjne **2** o budowie nietrwalej

oraz elementy rezystancyjne **3** o budowie trwałej, przy czym elementy rezystancyjne **2** o budowie nietrwalej są usytuowane na jednym zewnętrznym boku powstałej struktury oraz na ścieżkach poprzecznych. Elementy rezystancyjne **3** o trwałej budowie są rozmieszczone na drugim boku struktury. Skrajny zewnętrzny węzeł **6** jest przyłączony do uziemienia, zaś do zewnętrznego węzła **5** przyłączone jest zasilanie.

Na Fig. 2 pokazano rozbudowany w szerz układ czujnika. Elementy rezystancyjne **2** o budowie nietrwalej tworzą jedną ścieżkę główną pomiędzy węzłem zasilania **5** a węzłem uziemienia **6** wraz z rozchodzącymi się na boki gałęziami. Elementy rezystancyjne **3** o budowie trwałej są rozmieszczone na dwóch alternatywnych ścieżkach bocznych, które łączą węzeł zasilania **5** i uziemienia **6**. Elementy pojemnościowe **4** są włączone pomiędzy węzły na przekątnych klatek.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób monitorowania uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych za pomocą układu elektrycznego wbudowanego w strukturę elementu konstrukcyjnego lub połączonego trwale z elementem badanej konstrukcji, **znamienny tym**, że ze strukturą badanego elementu konstrukcyjnego łączy się układ złożony z elementów rezystancyjnych i pojemnościowych o znanej topologii połączeń pomiędzy poszczególnymi elementami, w którym część elementów rezystancyjnych ma budowę trwałą, po czym układ pobudza się zmiennym sygnałem testowym, wywołując stan nieustalony, rejestruje się odpowiedź referencyjną układu nieuszkodzonego w postaci dyskretnych przebiegów napięcia, zmierzonych we wstępnie ustalonych punktach pomiarowych i tworzy się zbiór wewnętrznych relacji w postaci macierzy wpływu, które są podstawą algorytmu obliczeniowego w Metodzie Dystorsji Wirtualnych, a następnie, w trakcie eksploatacji konstrukcji, dokonuje się kontrolnych pobudzeń układu tym samym zmiennym sygnałem testowym, po czym wykorzystując aktualnie zmierzoną, w tych samych punktach pomiarowych, odpowiedź układu, ocenia się jej zmiany w stosunku do odpowiedzi referencyjnej i posilkując się procedurami optymalizacji rozwiązuje się problem odwrotny lokalizacji uszkodzonych elementów układu elektrycznego o zmienionych wartościach rezystancji lub pojemności elektrycznej, tym samym określając miejsce wystąpienia uszkodzenia w strukturze elementu konstrukcyjnego.

2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że funkcja opisująca kształt sygnału testowego jest złożeniem funkcji harmonicznej oraz funkcji ograniczającej trójkątnej, rozkładu Gaussa lub harmonicznej według niższej częstotliwości

3. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że częstotliwość funkcji harmonicznej zawiera się w przedziale 1 Hz-10000 Hz.

4. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że algorytm identyfikacji zmian parametrów w układzie elementów rezystancyjnych i pojemnościowych bazuje na gradientowej optymalizacji, w którym funkcja celu jest sformułowana jako średniokwadratowa różnica pomiędzy odpowiedziami zmierzonymi dla układu uszkodzonego, a odpowiedziami referencyjnymi zmierzonymi dla układu nieuszkodzonego lub wyznaczonymi na podstawie modelu numerycznego.

5. Czujnik uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych postaci obwodu elektrycznego, zintegrowanego w materiale konstrukcji lub na jej powierzchni, **znamienny tym**, że w skład obwodu wchodzi elementy rezystancyjne o budowie nietrwalej, ulegające zniszczeniu na skutek powstających uszkodzeń mechanicznych w konstrukcji, rozmieszczonych tak, że tworzą strukturę otwartą, oraz elementy rezystancyjne o budowie trwałej, które tworzą co najmniej jedną alternatywną drogę dla przepływu prądu pomiędzy węzłami obwodu, do których dołączono zasilanie, a także elementy pojemnościowe, rozmieszczone tak, aby każdy element rezystancyjny o budowie nietrwalej, był połączony z elementem pojemnościowym.

Rysunki

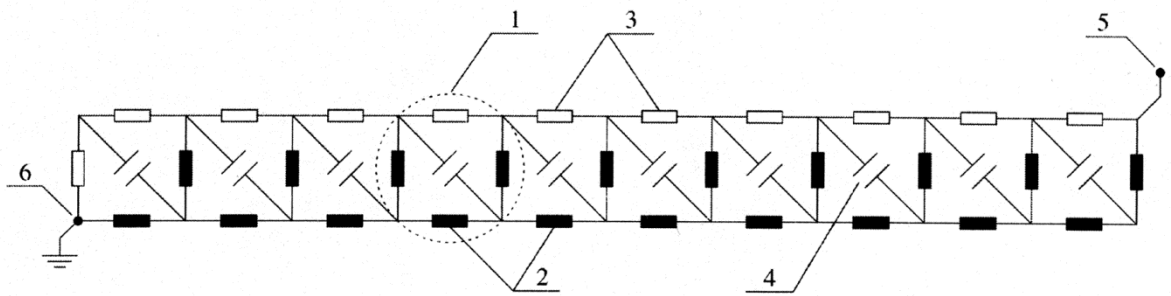


Fig. 1

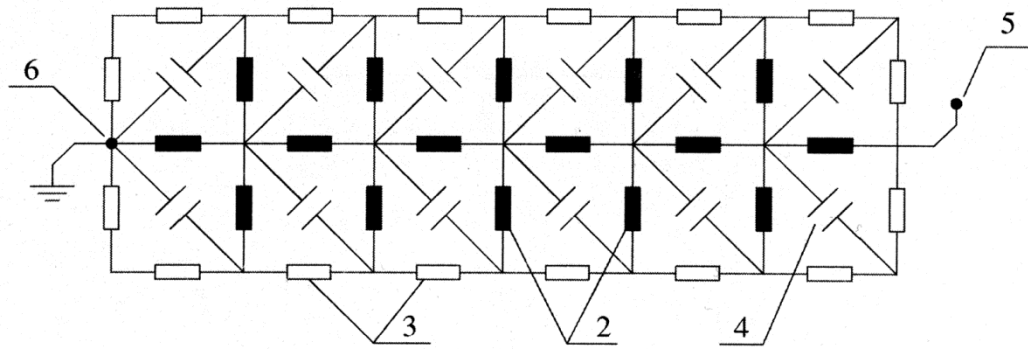


Fig. 2

