RZECZPOSPOLITA POLSKA	(12) OPIS PATENTOWY		(19) PL	(11) 235944 (13) B1
	(21) Numer zgłoszenia: 418028		(51) Int.Cl. G01M 5/00 (2006.01) G01B 21/32 (2006.01)	
Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej	(22) Data zgłoszenia: 20.07.2016			
(54) Sposób testowania konstrukcji obiektu				
(43) Zgłoszenie ogłoszono: 29.01.2018 BUP 03/18 (45) O udzieleniu patentu ogłoszono: 16.11.2020 WUP 18/20		(73) Uprawniony z pa AKADEMIA (IM. STANISŁ Kraków, PL (72) Twórca(y) wyna TOMASZ OW	atentu: SÓRNICZO- AWA STAS2 lazku: /ERKO, Biel	HUTNICZA ZICA W KRAKOWIE, sko-Biała, PL

Opis wynalazku

Dziedzina techniki

Przedmiotem wynalazku jest sposób testowania konstrukcji inżynierskich wspierających automatyczne identyfikowanie informacji o zdrowiu konstrukcji. Ma on zastosowanie podczas odbioru nowych konstrukcji (np. podczas badań pod obciążeniem próbnym), badań obiektów istniejących (np. na przykład podczas badań pod obciążeniem użytkowym) oraz dla sprawdzenia właściwości konstrukcji unikatowych. Znajduje on zastosowanie podczas testów sprawdzających budynki oraz budowle w szczególności podczas badań pod obciążeniem obiektów inżynierskich, podatnych na wzbudzenia dynamiczne takich jak:

- a) obiektów mostowych: mosty wiadukty, estakady,
- b) masztów oraz wieży,
- c) kominów wolnostojących (jedno i wieloprzewodowych).

Wynalazek umożliwia sprawdzenie czy zachowanie badanego obiektu odzwierciedla założone właściwości konstrukcyjne oraz pozwala monitorować czy podczas testów nie doszło do uszkodzenia obiektu.

<u>Stan techniki</u>

Podczas oceny bezpieczeństwa obiektów inżynierskich stosunkowo często stosuje się metody analizy danych opartych na zmierzonych sygnałach przez różnego rodzaju czujniki zamontowane na obiekcie (akcelerometry, odbiorniki GNSS, czujniki indukcyjne) lub czujniki zdalnie dokonujące pomiaru (radary interferometryczne, wizyjne systemy detekcji drgań, systemy fotogrametryczne, dalmierze lase-rowe). Zmienne w czasie sygnały pomiarowe zapisuje się w postaci szeregów czasowych oraz widm częstotliwościowych a ich wykresy w postaci spektrogramów poddaje się analizie. W szczególności uzyskane eksperymentalnie spektrogramy porównuje się z wykonaną uprzednio analizą modalną. Wy-niki eksperymentu służą zatem, między innymi, do kalibracji modelu obliczeniowego.

Ponadto na podstawie niestacjonarnej części sygnału pomiarowego oblicza się logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcji obliczając go wprost, na podstawie wartości amplitud analizowanego szeregu czasowego. Niedogodność takiego rozwiązania polega na tym, że podczas przejazdu kontrolnego może dojść do uszkodzenia obiektu (uszkodzenie podczas testu), a rozbieżność między analizą modalną a eksperymentem jest traktowane jako poprawka do kalibracji modelu obliczeniowego – jednak w tym przypadku rozbieżność występuje z powodu uszkodzenia.

Ponadto standardowe podejście nie umożliwia budowania bazy danych szeregów pomiarowych, które z czasem stanowią podstawę referencji do analiz zdrowia konstrukcji. Również obliczenie logarytmicznego dekrementu tłumienia według standardowych metod nie zapewnia wykorzystania w sposób optymalny całego szeregu pomiarowego reprezentującego drgania swobodne.

Z amerykańskiego opisu patentowego US 20140012517 A1 znany jest sposób szacowania uszkodzeń konstrukcji oparty na pomiarze obrotów przez akceleromętry MEMS przymocowane do kolumn budynku. Pomiar obrotu poszczególnych punktów jest transmitowany bezprzewodowo do jednostki centralnej gdzie następuje estymacja parametrów obrotów na podstawie modelu zniekształcenia plastycznego odkształcenia kolumny, który zawiera doświadczalnie ustalone parametry strukturalne dotyczące badanej części obiektu, takie jak współczynnik krzywizny kolumny czy punkt przegięcia. Uszkodzenie strukturalne budynku jest następnie szacowane przez określenie stanu uszkodzenia oparte na wynikach wartości progowych, które, odnoszą wartość resztkową modelu obrotu do uszkodzenia. W szczególnych przypadkach, wiele czujników jest podłączonych do każdej kolumny konstrukcji budynku aby zmierzyć odpowiednie obroty punktów wzdłuż całej wysokości kolumny.

Z amerykańskiego, opisu patentowego: US 20140316708 A1 znany jest sposób prowadzenia pomiarów czujnikami do monitorowania zdrowia konstrukcji składających się z trójosiowych akcelerometrów MEMS oraz trójosiowych żyroskopów. Dane z akcelerometrów oraz żyroskopów są przetwarzane poprzez całkowanie numeryczne w celu uzyskania oszacowania, obrotu i przemieszczenia monitorowanego obiektów w bezwzględnym, zewnętrznym układzie współrzędnych, w szczególności pomiary te mogę podlegać kalibracji z użyciem modelu strukturalnego obiektu. W szczególności dane pomiarowe mogę być uzupełnione danymi z magnetometrów.

Z amerykańskiego opisu patentowego US 6292108 B1 znany jest sposób modularnego bezprzewodowego systemu monitorującego uszkodzenia obiektów. System monitorujący składa się z wielu modułowych urządzeń akwizycji danych zasilanych bateryjnie, które przekazują informacje do centralnego

urządzenia gromadzenia danych i analiz za pomocą bezprzewodowego łącza danych. Każde z urządzeń akwizycji danych obejmuje mechaniczne czujniki drgań, obwody akwizycji danych, cyfrowy nadajnik bezprzewodowy oraz akumulator lub baterię zasilającą. Urządzenie służące do centralnego pobierania danych posiada odbiornik bezprzewodowy, który odbiera dane wysłane z urządzeń akwizycji danych oraz mikroprocesor do przetwarzania tych danych. W szczególności możliwe jest podłączenie mocniejszego komputera z urządzeniem centralnym, aby zapewnić bardziej zaawansowaną analizę podczas eksperymentu lub zjawiska.

<u>Istota</u>

W sposobie testowania konstrukcji obiektu według wynalazku na testowanym obiekcie umieszcza się czujniki pomiarowe a testowany obiekt poddaje się wzbudzeniu za pomocą testowego obciążenia. Następnie za pomocą czujników drgań uzyskuje się sygnały pomiarowe będące odpowiedzią konstrukcji na testowe obciążenie, przy czym

- (a) przed wzbudzeniem obiektu dokonuje się analizy modalnej i określa się wartości sygnałów referencyjnych w domenie częstotliwości,
- (b) przy czym dla sygnałów niestacjonarnych wyznacza się wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia, a dla sygnałów stacjonarnych wyznacza się model autoregresji i średniej ruchomej ARMA, na podstawie którego wyznacza się wartości współczynników DSF, dla których wyznacza się model regresji liniowej, następnie
- (c) testowany obiekt poddaje się wzbudzeniu za pomocą testowego obciążenia, a
- (d) otrzymane sygnały pomiarowe dzieli się w domenie czasu na sygnały stacjonarne i niestacjonarne, następnie
- (e) dla sygnałów niestacjonarnych określa się widmo amplitudowe, po czym
- (f) widmo amplitudowe sygnałów niestacjonarnych porównuje się z widmem amplitudowym uzyskanym w wyniku analizy modalnej wykonanej przed pomiarami w zakresie wartości w domenie częstotliwości, przy czym
- (g) dla sygnałów niestacjonarnych reprezentujących drgania swobodne określa się transformatę Hilberta, po czym
- (h) dla logarytmu transformaty Hilberta określa się regresję liniową na podstawie której określa się wartości współczynników logarytmicznego dekrementu tłumienia, przy czym
- dla sygnałów stacjonarnych, podzielonych na wektory danych wyznacza się liniowy model autoregresji i średniej ruchomej ARMA, na podstawie którego określa się wartości współczynników DSF, następnie
- (j) dla zbioru określonych współczynników DSF reprezentujących obiekt przed i po wzbudzeniu przeprowadza się regresję liniową, na podstawie której określa się odległości Cooka od modelu regresji dla każdego współczynnika DFS,
- (k) jeśli wartość odległości Cooka dla współczynników DSF reprezentujących obiekt po wzbudzeniu jest większa niż wartość trzykrotności średniej arytmetycznej odległości Cooka dla współczynników obliczonych dla współczynników DSF reprezentujących obiekt przed wzbudzeniem, to generuje się sygnał o uszkodzeniu konstrukcji.

Korzystnie widmo amplitudowe dla sygnałów niestacjonarnych określa się za pomocą szybkiej transformaty Fouriera FFT jeżeli próbkowanie sygnału było równomierne.

Korzystnie widmo amplitudowe dla sygnałów niestacjonarnych określa się za pomocą analizy spektralnej metodą najmniejszych kwadratów LSSA jeżeli próbkowanie sygnału było nierównomierne w czasie.

Korzystnie czujniki pomiarowe umieszcza się bezpośrednio na testowanym obiekcie.

Korzystnie czujnikiem pomiarowym jest akcelerometr.

Korzystnie czujnikiem pomiarowym jest radar interferometryczny.

Korzystnie czujnikiem pomiarowym jest odbiornik GNSS.

Korzystnie normalizuje się wartości sygnałów referencyjnych w domenie częstotliwości.

Korzystnie znormalizowanym wartościom sygnałów referencyjnych przyporządkowuje się etykiety wskazujące położenie czujnika lub sygnału pomiarowego dla systemu teledetekcyjnego i warunków rejestracji.

Korzystnie warunkami rejestracji są temperatura i wilgotność i nasłonecznienie.

Korzystnie znormalizowane wartości sygnałów dzieli się w domenie czasu na wektory, na podstawie których określa się modele ARMA, a następnie współczynniki DSF i przyporządkowuje się im odległości Cooka w modelu regresji liniowej. Korzystnie czujnikiem pomiarowym jest czujnik indukcyjny.

Korzystne skutki wynalazku (zalety)

Rozwiązanie według wynalazku pozwala na przeprowadzenie badań pod obciążeniem próbnym, (projektowanym) w taki sposób, że możliwe jest niezawodne określenie czy podczas prób nie doszło do uszkodzenia obiektu.

Rozwiązanie według wynalazku pozwala na przeprowadzenie badań, w taki sposób, że zarejestrowane szeregi czasowe odzwierciadlające dynamiczne zachowanie obiektu analizowane są w sposób umożliwiających ocenę właściwości tłumienia konstrukcyjnego obiektu na podstawie kompletnego materiału pomiarowego – do obliczeń wykorzystywany jest cały materiał pomiarowy reprezentujący drgania swobodne obiektu.

Rozwiązanie według wynalazku pozwala na bardzo szybkie i niezawodne określenie czy doszło do uszkodzenia konstrukcji w przypadku przeprowadzenie prób pod obciążeniem użytkowym. Pozwala zatem, na przykład dla obiektów mostowych, określić który z przejeżdżających samochodów doprowadził do uszkodzenia, nawet jeżeli odstępy czasu pomiędzy kolejnym przejazdami samochodów były niewielkie.

Rozwiązanie według wynalazku pozwala na gromadzenie i analizowanie danych pomiarowych w taki sposób, że porównanie z danymi pozyskanymi w kolejnych etapach pomiarowych (w późniejszym terminie) może odbywać się nawet jeżeli pozyskane one zostały w innych warunkach atmosferycznych.

Figury

Przedmiot wynalazku jest objaśniony na przykładzie wykonania na rysunku, na którym:

Fig. 1 przedstawia przykładowy zarejestrowany radarem interferometrycznym sygnał pomiarowy (Rbin 22) oraz jego składowe: D1 – sygnał stacjonarny reprezentujący zachowanie i stan obiektu przed wzbudzeniem, D2 – sygnał reprezentujący odpowiedź konstrukcji na wymuszenie, D3 – sygnał reprezentujący drgania swobodne konstrukcji, D4 – sygnał stacjonarny, reprezentujący zachowanie i stan obiektu po wzbudzeniu,

Fig. 2 przedstawia sygnał reprezentujący drgania swobodne – mające charakter oscylatora tłumionego oraz jego reprezentacja w domenie częstotliwości,

Fig. 3 przedstawia obwiednię sygnału reprezentującego drgania swobodne obliczona na podstawie transformaty Hilberta,

Fig. 4 przedstawia wartości realizacji współczynnika DSF z danych reprezentujących obiekt przed uszkodzeniem (kółka) i po uszkodzeniu (znaki +),

Fig. 5 przedstawia następujące po sobie dwa wymuszenia oraz zaznaczone strzałą ograniczony zbiór danych reprezentujące stan obiektu po ustaniu drgań swobodnych, przed kolejnym wzbudzeniem,

Fig. 6 przedstawia przykład obliczenia współczynników DSF dla przypadku w którym ilość informacji reprezentujących obiekt po wymuszeniu jest ograniczona. Strzałka reprezentuje wartości współczynników DSF dla przykładowych wektorów danych o indeksach 51–53,

Fig. 7 przedstawia przykład obliczenia odległości Cooka dla współczynników DSF, których średnia jest obliczana na podstawie aproksymacji regresją liniową,

Fig. 8 przedstawia przykład postępowania w formie schematu blokowego.

<u>Przykład realizacji</u>

Przedmiotem wynalazku jest sposób postępowania – prowadzania pomiarów i ich analizy, w szczególności mający zastosowanie podczas badań realizowanych naziemnymi radarami interferometrycznymi.

W rozwiązaniu według wynalazku przed poddaniem konstrukcji działaniu obciążenia testowego dokonuje się analizy modalnej obiektu. W wyniku tej analizy modalnej otrzymuje się model modalny w postaci zbioru częstotliwości własnych, postaci drgań oraz współczynników tłumienia. Znajomość tych parametrów, umożliwia przewidywanie zachowania się obiektu na skutek dowolnych zaburzeń równowagi. Analiza ta jest wykorzystywana do celów modyfikacji konstrukcji lub diagnozowania stanu konstrukcji. Zagadnienie analizy modalnej jest znane specjalistom w dziedzinie i szczegóły tego zagadnienia nie będą stanowić przedmiotu opisu w niniejszym zgłoszeniu.

W sposobie według wynalazku badany obiekt będzie poddany wymuszeniu, na przykład uderzeniu (udarowi) lub wzbudzeniu mechanicznemu poprzez przejazd ciężarówek. Zachowanie konstrukcji przed wzbudzeniem, podczas odpowiedzi konstrukcji na wzbudzenie oraz podczas drgań swobodnych będących wynikiem wzbudzenia jak również zachowanie konstrukcji po ustaniu drgań swobodnych będzie rejestrowane czujnikami.

4

We wstępnym etapie, podczas pomiarów na obiekcie, czujniki pomiarowe: akcelerometry, punkty mierzone radarem interferometrycznym, odbiornikami GNSS, są umiejscawiane w taki sposób aby

- a) możliwe jak najdokładniej identyfikować postacie drgań wynikające z analizy modalnej konstrukcji, na przykład miejsca zakotwień układu wantowego w pomoście, miejsca w których znajdują się poprzecznice, pylony mostowe.
- b) znajdować się w miejscach, które podczas badań pod obciążeniami próbnymi oraz badań pod obciążeniami użytkowymi są narażone na uszkodzenia, na przykład w miejscach gdzie naprężenia są maksymalne – w środku przęsła od dołu oraz nad podporami pośrednimi od góry.

Czujniki zlokalizowane są na obiekcie pomiarowym lub pomiary przeprowadzany jest urządzeniami wykonującymi pomiar teledetekcyjnie.

W pierwszej części lokalizacja punktów pomiarowych odpowiada miejscu, w którym spodziewamy się wystąpienia uszkodzeń (na podstawie typu konstrukcji) lub będzie występowała strzałka fali mechanicznej postaci drgań zidentyfikowanej w analizę widmowej. Następnie przeprowadza się monitorowany eksperyment czyli wzbudzenie konstrukcji, poprzez zastosowanie próbnego obciążenia mostowego.

Wyniki pomiarów dzieli się na trzy kategorie: dane reprezentujące sygnały stacjonarne, dane reprezentujące wytłumiające się drgania swobodne obiektu oraz dane reprezentujące odpowiedź konstrukcji na wymuszenie. Na podstawie panujących warunków, rejestrując pomiary w pamięci komputera, tworzy się referencyjną bazę danych pomiarowych, tak aby przyszłe pomiary (kolejne epoki pomiarowe) mogły być porównywane do danych pozyskanych w analogicznych warunkach.

Referencyjna baza danych powstaje poprzez normalizację szeregów czasowych oraz przypisanie etykiet na podstawie położenia, typu sygnału pomiarowego oraz warunków w jakich nastąpiła rejestracja (temperatura, wilgotność, nasłonecznienie). Ponadto każdy z szeregów czasowych dzielony jest na wektory o tej samej ilości próbek każdy.

Dane reprezentujące drgania swobodne są wykorzystane do obliczenia prędkości z jaką badany obiekt się wytłumia.

W szeregi czasowe mające charakter sygnałów stacjonarnych wpisuje się znany z literatury przedmiotu model ARMA (model autoregresji i średniej ruchomej), a na jego podstawie oblicza się wartości współczynników DSF (dla każdego wektora danych niezależnie). Wyniki pomiarów oraz analiz w postaci szeregów czasowych oraz spektrogramów dostarcza się do pamięci komputera.

Zatem, sygnał zarejestrowany, którego przebieg zobrazowano na Fig. 1, jest dzielony w domenie czasu na cztery części:

- a) Dane reprezentujące zachowanie obiektu przed wymuszeniem mające charakter sygnału stacjonarnego (na Fig. 1 oznaczone jako D1).
- b) Dane reprezentujące odpowiedź konstrukcji (na Fig. 1 oznaczone jako D2).
- c) Dane reprezentujące drgania swobodne. Mają one charakter oscylatora tłumionego (na Fig. 1 oznaczone jako D3).
- d) Dane reprezentujące zachowanie obiektu po wytłumieniu drgań swobodnych mające charakter sygnału stacjonarnego (na Fig. 1 oznaczone jako D4).

Następnie sygnał reprezentujący drgania swobodne (Fig. 1, D3) jest analizowany poprzez obliczenie widma amplitudowego szybką transformatą Fouriera – FFT (jeżeli próbkowanie sygnału było równomierne) lub poprzez analizę spektralną metodą najmniejszych kwadratów – LSSA (jeżeli próbkowanie sygnału było nierównomierne w czasie). Przykład analizy widmowej pokazany jest na Fig. 2.

W kolejnym etapie, wartości zidentyfikowanych amplitud uzyskanych z tych części szeregów czasowych, które reprezentują drgania swobodne porównywane są z wynikami analizy modalnej, przeprowadzanej przed przystąpieniem do pomiarów, w zakresie wartości w domenie częstotliwości.

Drgania swobodne opisane są równaniem oscylatora tłumionego za pomocą wzoru nr 1:

$x(t) = Ae^{-Bt}\cos(wt + f) \text{ wzór nr 1}$

gdzie A oznacza amplitudę, B to współczynnik tłumienia drgań, oraz w, f, t to odpowiednio okres, faza początkowa i czas.

Następnie dla sygnału reprezentującego drgania swobodne (patrz Fig. 1 D3) oblicza się obwiednię poprzez wyznaczenie transformaty Hilberta (co pokazano na Fig. 3). Dla logarytmu transformaty wykonuje się regresję liniową. Aby wynik był optymalny, regresje liniową wykonuje się wyrównaniem

odpornym. W regresji nie bierze się pod uwagę pierwszych oraz ostatnich 5% danych reprezentujących oscylator tłumiony.

W ten sposób otrzymuje się współczynnik tłumienia – jest to współczynnik nachylenia prostej regresji opisany wzorem nr 2:

$$y = Bx + C$$
; wzór nr 2
 $DD = B * T$

gdzie B – współczynnik nachylenia prostej regresji będący współczynnikiem tłumienia badanego obiektu inżynierskiego, T – okres drgań obiektu, DD – szukany logarytmiczny dekrement tłumienia .Wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia uzyskuje się poprzez wymnożenie współczynnika tłumienia oraz okresu drgań tłumionych (opisany wzorem nr 2).

W kolejnym etapie w te części szeregów czasowych, które reprezentują sygnał stacjonarny (wskazane na Fig. 1 jako D1 i D4) wpisywany jest model ARMA (liniowy model autoregresji i średniej ruchomej) określony wzorem nr 3:

$$x_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{p} a_k x_{ij}(t-k) + \sum_{k=1}^{q} b_k e_{ij}(t-k) + e_{ij}(t) \text{ wzór nr 3}$$

gdzie: $x_{ij}(t)$ to syngnał wejściowy, a_k i b_k to k-te współczynniki modelu autoregresji (AR) i średniej ruchomej (MA), p i q to rzędy modelu AR and MA oraz $e_{ij}(t)$ wartość reszt modelu.

Na podstawie wyników uzyskanych modelem ARMA oblicza się, znany z literatury współczynnik DSF (ang. Damege Sensitive Feature) jako iloraz współczynnika autoregresji pierwszego rzędu i pierwiastka sumy kwadratów pierwszych trzech współczynników autoregresji dany wzorem 4:

$$DSF = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}}$$
, wzór nr 4

Wartość DSF oblicza się dla wektorów danych reprezentujących obiekt przed (na Fig. 4 oznaczone jako kółka) oraz po wymuszeniu (na Fig. 4 oznaczone jako znaki +).

W praktyce jednak, zwłaszcza dla badań pod obciążeniem użytkowym ilość danych, które mogą stanowić podstawę do wyznaczenia modelu ARMA oraz współczynników DSF jest ograniczona ze względu na pojawienie się następnego wymuszenia na badanym obiekcie. Na Fig. 5 przedstawiono następujące po sobie wymuszenia oraz zaznaczono strzałką ograniczoną liczbę danych reprezentujących zachowanie obiektu po ustaniu drgań swobodnych wywołanych pierwszym wymuszeniem. W takim przypadku po wymuszeniu można określić jedynie ograniczoną liczbę realizacji współczynnika DSF. Aby stwierdzić czy wymuszenie doprowadziło do uszkodzenia obiektu konieczne jest porównanie średniej wartości współczynnika DSF przed i po wymuszeniu. Dla obliczonych na podstawie danych pomiarowych współczynników DSF wykonuje się regresję liniową. Jeżeli średnia wartość parametru DSF po wzbudzeniu istotnie różnią się od średniej wartości przed wzbudzeniem uznaje się, że mogło dojść do uszkodzenia konstrukcji.

Dla zbioru obliczonych współczynników DSF oblicza się regresję liniową. Obserwacje przed oraz po domniemanym uszkodzeniu są traktowane jako jednolity zbiór danych. Dla każdej obserwacji oblicza się odległość Cooka według wzoru:

$$D_{i} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (y_{j} - y_{j(i)})^{2}}{pMSE}, \text{wzór nr 5}$$

W przedstawianym rozwiązaniu kryterium różnicy to trzykrotna średnia odległość Cooka w zbiorze danych. Dzięki temu natychmiast po wykonaniu wzbudzania próbnego można szacować czy doprowadziło ono do uszkodzenia obiektu. Jeżeli obserwacje (realizacje współczynnika DSF) reprezentujące obiekt po domniemanym uszkodzeniu (po wymuszeniu) przewyższają trzykrotną średnią wartość odległości Cooka to uznajemy, że doszło do uszkodzenia obiektu danym wymuszeniem.

Fig. 7 przedstawia przykład w którym wektory danych o indeksach 51–53 zostały zidentyfikowane jako reprezentujące obiekt po uszkodzeniu.

Zastrzeżenia patentowe

- Sposób testowania konstrukcji obiektu, w którym na testowanym obiekcie umieszcza się czujniki pomiarowe a testowany obiekt poddaje się wzbudzeniu za pomocą testowego obciążenia, i za pomocą czujników drgań uzyskuje się sygnały pomiarowe będące odpowiedzią konstrukcji na testowe obciążenie znamienny tym, że
 - (a) przed wzbudzeniem obiektu dokonuje się analizy modalnej i określa się wartości sygnałów referencyjnych w domenie częstotliwości,
 - (b) przy czym dla sygnałów niestacjonarnych wyznacza się wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia, a dla sygnałów stacjonarnych wyznacza się model autoregresji i średniej ruchomej ARMA, na podstawie którego wyznacza się wartości współczynników DSF, dla których wyznacza się model regresji liniowej, następnie
 - (c) testowany obiekt poddaje się wzbudzeniu za pomocą testowego obciążenia, a
 - (d) otrzymane sygnały pomiarowe dzieli się w domenie czasu na sygnały stacjonarne i niestacjonarne, następnie
 - (e) dla sygnałów niestacjonarnych określa się widmo amplitudowe, po czym
 - widmo amplitudowe sygnałów niestacjonarnych porównuje się z widmem amplitudowym uzyskanym w wyniku analizy modalnej wykonanej przed pomiarami w zakresie wartości w domenie częstotliwości, przy czym
 - (g) dla sygnałów niestacjonarnych reprezentujących drgania swobodne określa się transformatę Hilberta, po czym
 - (h) dla logarytmu transformaty Hilberta określa się regresję liniową na podstawie której określa się wartości współczynników logarytmicznego dekrementu tłumienia, przy czym
 - dla sygnałów stacjonarnych, podzielonych na wektory danych wyznacza się liniowy model autoregresji i średniej ruchomej ARMA, na podstawie którego określa się wartości współczynników DSF, następnie
 - dla zbioru określonych współczynników DSF reprezentujących obiekt przed i po wzbudzeniu przeprowadza się regresję liniową, na podstawie której określa się odległości Cooka od modelu regresji dla każdego współczynnika DFS,
 - (k) jeśli wartość odległości Cooka dla współczynników DSF reprezentujących obiekt po wzbudzeniu jest większa niż wartość trzykrotności średniej arytmetycznej odległości Cooka dla współczynników obliczonych dla współczynników DSF reprezentujących obiekt przed wzbudzeniem, to generuje się sygnał o uszkodzeniu konstrukcji.
- Sposób testowania konstrukcji obiektu według zastrz. 1 znamienny tym, że widmo amplitudowe dla sygnałów niestacjonarnych określa się za pomocą szybkiej transformaty Fouriera FFT jeżeli próbkowanie sygnału było równomierne.
- 3. Sposób testowania konstrukcji obiektu według zastrz. 1 **znamienny tym**, że widmo amplitudowe dla sygnałów niestacjonarnych określa się za pomocą analizy spektralnej metodą najmniejszych kwadratów LSSA jeżeli próbkowanie sygnału było nierównomierne w czasie.
- 4. Sposób testowania konstrukcji obiektu według zastrz. 1 albo 2, albo 3, **znamienny tym**, że czujniki pomiarowe umieszcza się bezpośrednio na testowanym obiekcie.
- 5. Sposób testowania konstrukcji obiektu według zastrz. 1 albo 2, albo 3, **znamienny tym**, że czujnikiem pomiarowym jest akcelerometr.
- 6. Sposób testowania konstrukcji obiektu według zastrz. 1 albo 2, albo 3, albo 4, **znamienny tym**, że czujnikiem pomiarowym jest radar interferometryczny.
- 7. Sposób testowania konstrukcji obiektu według zastrz. 1 albo 2, albo 3, albo 4, **znamienny tym**, że czujnikiem pomiarowym jest odbiornik GNSS.
- 8. Sposób testowania konstrukcji obiektu według jednego z poprzednich zastrzeżeń **znamienny tym**, że normalizuje się wartości sygnałów referencyjnych w domenie częstotliwości.
- Sposób testowania konstrukcji obiektu zastrz. 8 znamienny tym, że znormalizowanym wartościom sygnałów referencyjnych przyporządkowuje się etykiety wskazujące położenie czujnika lub sygnału pomiarowego dla systemu teledetekcyjnego i warunków rejestracji.
- 10. Sposób testowania konstrukcji obiektu zastrz. 9 **znamienny tym**, że warunkami rejestracji są temperatura i wilgotność i nasłonecznienie.

- 11. Sposób testowania konstrukcji obiektu zastrz. 8 **znamienny tym**, że znormalizowane wartości sygnałów dzieli się w domenie czasu na wektory, na podstawie których określa się modele ARMA, a następnie współczynniki DSF i przyporządkowuje się im odległości Cooka w modelu regresji liniowej.
- 12. Sposób testowania konstrukcji obiektu według zastrz. 1 albo 2, albo 3, albo 4, **znamienny tym**, że czujnikiem pomiarowym jest czujnik indukcyjny.



Rysunki







Fig. 5











