

**THE RELIABILITY TESTING OF BRICK
INFRASTRUCTURE WITH OPERATING MODAL
ANALYSIS**

**BADANIE NIEZAWODNOŚCI INFRASTRUKTURY
MUROWEJ Z UŻYCIEM OPERACYJNEJ ANALIZY
MODALNEJ**

Mariusz Żółtowski

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

mazolto@utp.edu.pl

Abstract: Modal analysis is widely used in the removal of defects caused by vibration of infrastructure, structure modification, updating the analytical model, or the control of the state and is used to monitor the vibration of structures in the aerospace and civil engineering mechanics from early 1990 began to pay close attention to the use of operational modal analysis (OMA) in a study of the existing building structures. In this case, the vibration exciter platforms, buildings, towers, bridges, etc. to force Operating (ambient). Here we measure only the response of the force generated by the environment. OMA is also very attractive for aerospace and mechanical engineering. This article presents the results of the existing building structure (reinforced concrete wall using operational modal analysis software and used to carry out the LMS and visualization of the results of such research.

Keywords: operational modal analysis, the frequency of vibration, stability diagram

Streszczenie: Analiza modalna jest szeroko stosowana w usuwaniu usterek spowodowanych drganiami infrastruktury, modyfikacją struktury, aktualizacją modelu analitycznego, czy kontrolą stanu, a także wykorzystywana jest do monitorowania wibracji struktur w przemyśle lotniczym i mechanice inżynierii lądowej. Od początku 1990 zaczęto zwracać baczniejszą uwagę na wykorzystywanie operacyjnej analizy modalnej (OMA) w badaniu istniejących konstrukcji budowlanych. W tym przypadku wzbudnikiem drgań platformy, budynków, wież, mostów itp. jest wymuszenie eksploatacyjne (otoczenie). Mierzymy tu tylko odpowiedzi układu na wymuszenia generowane przez otoczenie. OMA jest również bardzo atrakcyjna dla przemysłu lotniczego i inżynierii mechanicznej. W tym artykule przedstawiono wyniki badań istniejącej konstrukcji budowlanej (ściana żelbetonowa) z zastosowaniem operacyjnej analizy modalnej i oprogramowaniem LMS służącym do przeprowadzenia i wizualizacji wyników takich badań.

Słowa kluczowe: operacyjna analiza modalna, częstość drgań, diagram stabilizacyjny

1. Wprowadzenie

Analiza modalna jest szeroko stosowana w usuwaniu usterek spowodowanych drganiami infrastruktury, modyfikacją struktury, aktualizacją modelu analitycznego, czy kontrolą stanu, a także wykorzystywana jest do monitorowania wibracji struktur w przemyśle lotniczym i mechanice inżynierii lądowej [22,25,33]. Tradycyjna eksperymentalna analiza modalna (EAM) korzysta z wejścia (wzbudzenie) i wyjścia (odpowiedź) i mierzy się ją w celu oszacowania parametrów modalnych, składających się z częstości modalnych, tłumienia i postaci drgań. Jednak tradycyjne EAM ma pewne ograniczenia, takie jak:

- w tradycyjnej EAM, sztuczne wzbudzenie jest normalnie przeprowadzone w celu pomiaru częstotliwości drgań;
- tradycyjna EAM jest zwykle prowadzona w środowisku laboratoryjnym, ale w wielu przypadkach prawdziwy stan degradacji może się znacznie różnić od tych badanych w środowisku laboratoryjnym.

Od początku 1990 zaczęto zwracać baczniejszą uwagę na wykorzystywanie operacyjnej analizy modalnej (OMA) w badaniu istniejących konstrukcji budowlanych. W tym przypadku wzbudnikiem drgań platformy, budynków, wież, mostów itp. jest wymuszenie eksploatacyjne (otoczenie). Mierzymy tu tylko odpowiedzi układu na wymuszenia generowane przez otoczenie. OMA jest również bardzo atrakcyjna dla przemysłu lotniczego i inżynierii mechanicznej z powodu wielu zalet, takich jak:

- OMA jest tania i pozwala szybko i skutecznie prowadzić pomiary;
- brak problemu ze sztucznym wzbudzaniem drgań;
- można ocenić cechy dynamiczne całego, rzeczywiście istniejącego układu;
- towarzyszy jej nie skomplikowana w obsłudze aparatura pomiarowa;
- uzyskać można bardziej reprezentatywne wyniki badań niż w środowisku laboratoryjnym;
- dzięki szerokiemu pasmu losowego pobudzenia w warunkach normalnej eksploatacji, wyniki pomiarów są bardziej reprezentatywne.

W tym artykule przedstawiono wyniki badań istniejącej konstrukcji budowlanej (ściana żelbetonowa) z zastosowaniem operacyjnej analizy modalnej i oprogramowaniem LMS służącym do przeprowadzenia i wizualizacji wyników takich badań.

2. Elementy dynamiki konstrukcji budowlanych

Jednym z podstawowych kryteriów stosowanych w projektowaniu współczesnych konstrukcji budowlanych są własności dynamiczne konstrukcji. Mają one bezpośredni wpływ na drgania układu, emitowany hałas, wytrzymałość zmęczeniową i stabilność konstrukcji. Analizy własności dynamicznych w większości przypadków spotykanych w praktyce dokonuje się na podstawie analizy zachowania się modelu konstrukcji.

Jakość analizy zależy od wiarygodności modelu, mierzonej zgodnością zachowania obiektu i modelu poddanych zaburzeniom tego samego rodzaju. Model konstrukcji

może być tworzony w procesie analitycznych przekształceń formalizmów stosowanych do opisu dynamiki układu bądź na podstawie wyników eksperymentów wykonywanych na rzeczywistym obiekcie [22,23,25,33].

Najczęściej do opisu dynamiki konstrukcji stosuje się modele strukturalne (MES), które buduje się zgodnie z zasadami metody elementów skończonych. Metoda ta polega na dyskretyzacji układu o ciągłym rozkładzie parametrów, przy przyjęciu pewnych założeń upraszczających, np. związanych z linią ugięcia modelowanego elementu (metoda przemieszczeń). Jednak zbudowane w ten sposób modele, w szczególności do celów analizy dynamiki, dają wyniki przybliżone, których zastosowanie jest bardzo ograniczone. Wymagają one dostrajania na podstawie znajomości własności zmierzonych na rzeczywistym obiekcie.

Model strukturalny można wykorzystać do wyznaczania modeli innego rodzaju, np. modelu modalnego będącego zbiorem częstości drgań własnych, odpowiadającym im współczynników tłumienia i postaci drgań - przez zastosowanie odpowiedniej transformacji współrzędnych modelu. Model taki umożliwia przewidywanie zachowania się modelowanej konstrukcji przy dowolnym wymuszeniu. Model modalny może być zidentyfikowany na rzeczywistym obiekcie na podstawie wyników eksperymentu identyfikacyjnego. Jest to jeden z najczęściej identyfikowanych modeli rzeczywistych konstrukcji budowlanych, stosowany z wykorzystaniem drgań [3].

Wykorzystanie drgań w badaniu degradacji (jakości) konstrukcji budowlanych wynika z następujących powodów:

- procesy drganiowe są odzwierciedleniem zjawisk fizycznych zachodzących w konstrukcjach (odkształcenia, naprężenia, pęknięcia), od których zależy stopień destrukcji (zdatność) i poprawne funkcjonowanie, co wynika z charakteru rozprzestrzeniania się procesu drganiowego;
- łatwość pomiaru procesów drganiowych w warunkach normalnej eksploatacji obiektu, bez konieczności wyłączania go z ruchu oraz specjalnego przygotowania, umożliwia bezdemontażową ocenę stanu destrukcji;
- procesy drganiowe cechują się dużą prędkością przekazywania informacji w jednostce czasu, określoną wzorem Shanona:

$$C = F \lg_2 \left(1 + \frac{N_S}{N_Z} \right) \quad (1)$$

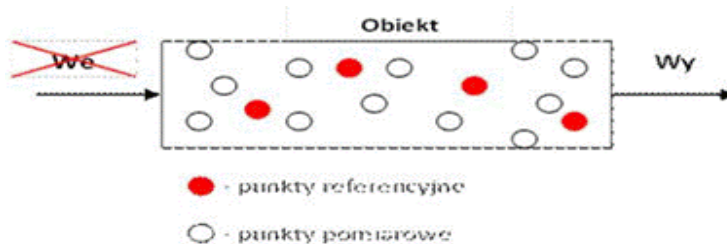
zależną od szerokości widmowej procesu F oraz stosunku mocy sygnału użytecznego N_S do mocy szumów zakłócających N_Z ;

- procesy drganiowe cechują się złożoną strukturą czasową, amplitudową i częstotliwościową, co zapewnia przy właściwym ich przetwarzaniu ocenę stanu całej konstrukcji, jak również pojedynczych jej elementów.

Podczas eksploatacji konstrukcji, na skutek istnienia szeregu **czynników zewnętrznych** (wymuszenia środowiska, wymuszeń od innych konstrukcji) oraz **wewnętrznych** (starzenie, zużycia, współpraca elementów) w konstrukcji następują zaburzenia stanów równowagi, które rozchodzą się w ośrodku

sprężystym - materiale, z którego zbudowana jest konstrukcja (rys.1). Zaburzenia mają charakter dynamiczny i zachowują warunki równowagi pomiędzy stanem bezwładności, sprężystości, tłumienia i wymuszenia. Powoduje to w konsekwencji rozpraszanie energii fal, ich ugięcia, odbicia i wzajemne nakładanie się. Istnienie źródeł i rozprzestrzenianie się zaburzeń powoduje występowanie drgań elementów konstrukcji i otaczającego je środowiska.

Wyodrębniając w analizie stanu dynamicznego konstrukcji **procesy wejściowe, strukturę i procesy wyjściowe**, należy pamiętać o ich losowym charakterze.



Rys.1 Istota pomiarowa w eksploatacyjnej analizie modalnej

Wejście wewnętrzne, traktowane jako zbiór wielkości wymuszających - określających strukturę konstrukcji (kształt, jakość wykonania, luzy itd.) i sposób współpracy elementów jest kształtowane w warunkach losowych podczas wytwarzania, co ujawnia się własnościami losowymi podczas funkcjonowania.

Wejście zewnętrzne, określające warunki współpracy elementów konstrukcji z innymi elementami systemu (zmiany obciążeń, prędkości, wpływ środowiska) ma w praktyce również charakter losowy.

Bogactwo możliwości zaistnienia losowości i istnienia zakłóceń jest przyczyną dodatkowych założeń dotyczących wejść oraz zachodzących transformacji stanów destrukcji konstrukcji. Dotyczą one założeń o **liniowości, stacjonarności i ergodyczności** modeli obiektów i procesów [22,33].

3. Środowisko eksperymentalnej analizy modalnej

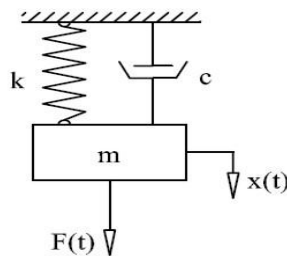
Analiza modalna jest powszechnie stosowana do badania własności dynamicznych różnorodnych konstrukcji. Badania modalne przeprowadza się dla miniaturowych i precyzyjnych konstrukcji, jak np. dyski optyczne [8], a także dla dużych konstrukcji budowlanych, jak zapory wodne czy mosty [22]. W wyniku analizy modalnej otrzymuje się *model modalny konstrukcji*, który może być zastosowany do rozwiązywania wielu inżynierskich problemów związanych z syntezą układów, analizą zachowania się konstrukcji pod wpływem różnych wymuszeń, modyfikacją własności dynamicznych, syntezą układów sterowania itp.

Jednym z podstawowych problemów, które mogą być efektywnie rozwiązane za pomocą analizy modalnej jest optymalizacja własności dynamicznych konstrukcji budowlanych, rozumiana jako modyfikacja konstrukcji w celu minimalizacji rozprzestrzeniania się w niej drgań. Techniki tutaj stosowane są nazywane *metodami*

modyfikacji strukturalnej konstrukcji. Metody te wywodzą się wprost z metody elementów skończonych i są oparte na aparacie matematycznym umożliwiającym badanie wrażliwości zachowania się modeli na zmiany ich parametrów modalnych.

Przedstawione poniżej informacje stanowią podstawy analizy modalnej, która w krajach o wysoko rozwiniętej technologii jest powszechnie stosowana w praktyce jako narzędzie wspomagania procesu projektowania obiektów (zamiennie do MES), w których istotnym wskaźnikiem jakości konstrukcji jest jej zachowanie w warunkach dynamicznych.

Jak już wspomniano układ o jednym stopniu swobody jest najprostszym modelem fizycznym reprezentującym całą klasę obiektów rzeczywistych określonych następującymi parametrami: masą – m , stałą sprężystości – k , współczynnikiem tłumienia – c , i siłą wymuszającą – F . Po wykorzystaniu wprowadzonych parametrów i zasad opisu modelu (rys.2) otrzymano równanie różniczkowe ruchu drgającego układu o jednym stopniu swobody, wyrażone zależnością:



Rys.2 Układ o jednym stopniu swobody dla ruchu translacyjnego

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2)$$

gdzie: \ddot{x} , \dot{x} , x - wektory przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń.

W praktyce większość rodzajów tłumienia występującego w układach można zastąpić równoważnym tłumieniem wiskotycznym. Zakładając zerowe warunki początkowe: $[x(0)=0, \dot{x}(0)=0]$ oraz wykorzystując twierdzenie Laplace'a równanie (2) można przekształcić do postaci [22,25]:

$$(ms^2 + cs + k)X(s) = F(s) \quad (3)$$

gdzie: s – zmienna zespolona, $s = j\omega$.

Równanie można zapisać w formie uproszczonej:

$$Z(s) X(s) = F(s) \quad (4)$$

Wielkość $Z(s)$ jest nazywana *szytywnością dynamiczną*:

$$Z(s) = \frac{F(s)}{X(s)} \quad (5)$$

W praktycznych zastosowaniach analizy układów stosuje się odwrotność sztywności dynamicznej $H(s)$ zwaną *podatnością dynamiczną*:

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} \quad (6)$$

Podatność dynamiczną układu o jednym stopniu swobody w oparciu o równanie można zapisać jako funkcję poszczególnych parametrów układu:

$$H(s) = \frac{1}{m} \frac{1}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (7)$$

Pojęciami ściśle związanymi z analizą modalną są *bieguny układu*; zawierają one w sobie dwa składniki: częstości własne i współczynniki tłumienia. Mianownik z zależności nazywany jest *równaniem charakterystycznym*. Bieguny układu są definiowane jako pierwiastki równania charakterystycznego i dla równania mają one postać:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (8)$$

Na podstawie równania można zdefiniować szereg często stosowanych w analizie modalnej pojęć. Wśród nich wyróżnia się pojęcie *częstości własnej nietlumionej* (dla $c = 0$) opisane zależnością:

$$\varpi = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

W teorii drgań układów mechanicznych rozróżnia się trzy przypadki ruchu układów o jednym stopniu swobody: tłumienie krytyczne, nadkrytyczne i podkrytyczne. Występowanie jednego z tych przypadków zależy od wartości wyróżnika Δ dla równania charakterystycznego. Jeśli $\Delta=0$, to rozpatrujemy układ z tłumieniem krytycznym, które objawia się jedną oscylacją w ruchu swobodnym. Z warunku $\Delta=0$ wyznacza się *współczynnik tłumienia krytycznego* c_k :

$$c_k = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (10)$$

W analizie modalnej do oceny wielkości tłumienia w układzie stosuje się bezwymiarowy współczynnik tłumienia ξ wyrażony zależnością (11). Bardzo często wartość bezwymiarowego współczynnika tłumienia podaje się w procentach.

$$\xi = \frac{c}{c_k} \quad (11)$$

Jeżeli $\Delta > 0$, tłumienie w układzie jest *nadkrytyczne* i ruch swobodny odbywa się bez oscylacji. Współczynnik ξ w tym przypadku posiada wartość większą od 1.

Jeżeli $\Delta < 0$, tłumienie w układzie jest *podkrytyczne* i ruch swobodny ma charakter oscylacyjny. Współczynnik ξ w tym przypadku nie przekracza wartości 0,1.

Rozwiązanie równania ruchu dla przypadku ruchu swobodnego przyjmuje postać:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_1 e^{\lambda_1 t} + \mathbf{x}_2 e^{\lambda_2 t} \quad (12)$$

gdzie: λ_1, λ_2 – pierwiastki równania charakterystycznego.

W przypadku tłumienia podkrytycznego pierwiastki te są zespolone i mają następujące postacie:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \delta_1 + j\omega_1 \\ \lambda_2 &= \delta_2 + j\omega_2 \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie: δ_1 – współczynnik tłumienia odniesiony do częstości drgań własnych nietłumionych, ω_1 – częstość drgań własnych nietłumionych.

Wprowadzając do zależności uprzednio zdefiniowane wielkości otrzymuje się:

$$\lambda_1 = \left(-\xi_1 + j\sqrt{1 - \xi_1^2} \right) \Omega_1 \quad (14)$$

Bezwymiarowy współczynnik tłumienia wyraża zależność:

$$\xi_1 = \frac{\delta_1}{\sqrt{\omega_1^2 + \delta_1^2}} \quad (15)$$

Związek pomiędzy współczynnikiem tłumienia δ_1 a bezwymiarowym współczynnikiem tłumienia ξ_1 wyrażony został w poniższej postaci:

$$\delta_1 = -\xi_1 \Omega_1 \quad (16)$$

Częstość drgań własnych nietłumionych wyraża się zależnością [22]:

$$\Omega_1 = \sqrt{\omega_1^2 + \delta_1^2} \quad (17)$$

Bardzo często w analizie modalnej stosuje się pojęcie reszty modalnej. W celu jej zdefiniowania należy przekształcić równanie i zapisać w postaci iloczynowej:

$$H(s) = \frac{1}{\mathbf{m} (s - \lambda_1)(s - \lambda_1^*)} \quad (18)$$

Po dokonaniu rozkładu na ułamki proste zależności otrzymuje się równanie:

$$H(s) = \frac{A_1}{(s - \lambda_1)} + \frac{A_1^*}{(s - \lambda_1^*)} \quad (19)$$

gdzie: A_1 – reszta modalna określona wzorem:

$$A_1 = \frac{1}{2j\omega_1} \quad (20)$$

Analogicznie wyznacz się te wielkości dla układów o wielu stopniach swobody. W zastosowaniu klasycznej analizy modalnej do identyfikacji parametrów modalnych badanego obiektu w trakcie badań wyznacza się parametry modalne na podstawie pomiaru charakterystyk częstościowych zmierzonych na obiekcie w trakcie eksperymentu, polegającego na sterowanym wymuszeniu drgań układu i pomiarze odpowiedzi w postaci widma przyśpieszenia drgań. Na podstawie znajomości wymuszenia i widma odpowiedzi dokonuje się identyfikacji przebiegu charakterystyk częstościowych badanego układu. Przy pomocy takich metod realizowanych w dziedzinie częstości, jesteśmy w stanie wyznaczyć parametry modalne układu w otoczeniu pojedynczej częstości własnej lub w wybranym paśmie częstości zawierającym więcej jak jedną częstość własną. Dla wielu konstrukcji w warunkach eksploatacji działają na układ zupełnie inne siły wymuszające, które co do charakteru przebiegu czasowego, rozkładu przestrzennego i amplitudy nie mogą być realizowane w warunkach laboratoryjnych. Podobnie dla warunków brzegowych, które w trakcie eksperymentu zależą od możliwości zamocowania obiektu na stanowisku badawczym, różnią się one od warunków występujących w czasie eksploatacji. W praktycznych zastosowaniach realizacji badań modalnych obiektów, badany układ jest zbyt duży i posiada zbyt dużą masę, aby można było wymusić odpowiednią amplitudę ruchu w warunkach eksperymentu czynnego. Wymienione ograniczenia są minimalizowane poprzez zastosowanie metod analizy modalnej realizowanej na podstawie pomiarów przeprowadzonych w trakcie normalnej pracy obiektu.

Parametry modelu modalnego umożliwiają rozprężenie równań opisujących drgania układu, a ich wartości wyznacza się z zależności [22,25,33]:

$$m_r = \frac{1}{2j\varpi_r R_{ir}}; \quad k_r = \varpi_{nr}^2 m_r; \quad c_r = 2m_r \varpi_{rn} \delta_m \quad (21)$$

Wielkości te opisują własności układu związane z r -tą częstością własną i zmiany częstości własnej zależą wprost proporcjonalnie od wielkości zmian sztywności lub masy, jak też zależą od miejsca rozwoju uszkodzenia w konstrukcji. Przedstawione uzasadnienie wystarcza dla opisu zmian destrukcji elementów murowych, natomiast cała teoria z obszaru analizy modalnej opisana została w dostępnej literaturze [22,25].

Zastosowanie najnowocześniejszych technologii informatycznych w analizie modalnej powoduje, że otrzymane modele modalne stają się bardziej wiarygodne i mogą być wykorzystywane do rozwiązywania wielu problemów związanych z konstruowaniem złożonych obiektów budowlanych o zadanych własnościach dynamicznych.

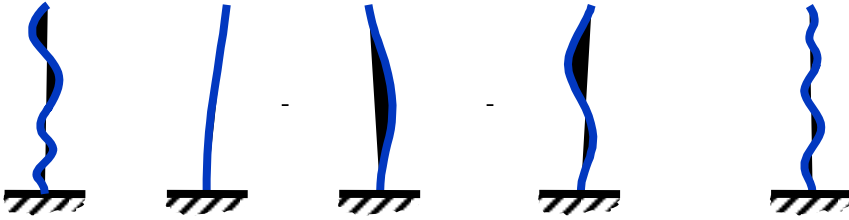
Analiza modalna jest stosowana dla celów modyfikacji konstrukcji, diagnostyki stanu konstrukcji, dla celów syntezy sterowania w układach aktywnej redukcji drgań oraz dla celów weryfikacji i walidacji modeli numerycznych, takich jak modele elementów skończonych czy elementów brzegowych.

Analiza modalna może być stosowana, jeżeli spełnione są następujące założenia:

- układ jest liniowy i jego dynamika może być opisana za pomocą liniowego układu równań różniczkowych zwyczajnych lub cząstkowych;
- współczynniki równań opisujących dynamikę obiektu są stałe w czasie pomiarów;
- układ jest obserwowalny i istnieje możliwość pomiaru wszystkich charakterystyk, których znajomość jest niezbędna do identyfikacji modelu;
- badany układ spełnia zasadę wzajemności Maxwella;
- tłumienie w układzie jest małe lub proporcjonalne.

Ważnym ograniczeniem stosowania analizy modalnej jest też założenie o ograniczonej liczbie stopni swobody badanego układu, z czym wiąże się wymiar macierzy mas, sztywności i tłumienia oraz liczba teoretycznych częstości własnych i postaci drgań.

Przy spełnieniu powyższych założeń analizę modalną można określić jako transformację (przekształcenie) złożonego układu, którego dynamika jest opisana za pomocą układu równań różniczkowych, na zbiór układów o jednym stopniu swobody opisanych za pomocą niezależnych równań różniczkowych drugiego rzędu - rys.3.



$$\{X(t)\} = q_1(t)\{\phi\}_1 + q_2(t)\{\phi\}_2 + q_3(t)\{\phi\}_3 + \dots + q_n(t)\{\phi\}_n$$

Rys.3. Rozkład drgań złożonych na drgania proste

Matematycznie, zadanie to można zdefiniować jako rozprzęgnięcie równań różniczkowych zwyczajnych, opisujących dynamikę badanej konstrukcji.

Eksploatacyjna analiza modalna wykorzystywana jest do identyfikacji obiektów o dużych rozmiarach przestrzennych i dużych masach, oparta jest o pomiar odpowiedzi na wymuszenia eksploatacyjne, będące wynikiem działania sił

zewnątrznych, bądź wymuszeń kinematycznych oraz procesu destrukcji elementów budowli [5,7,9,33].

Eksploatacyjna analiza modalna:

- umożliwia analizę modalną obiektów o dużych rozmiarach, dla których testy laboratoryjne byłyby utrudnione,
- modeluje poprawnie obiekty, gdyż wymuszenia odpowiadają obciążeniom rzeczywistym,
- umożliwia identyfikację modeli nieliniowych.

Metoda eksploatacyjnej analizy wyznaczania postaci drgań oparta jest o wielokanałowy pomiar odpowiedzi w węzłowych punktach obiektu rzeczywistego. System umożliwia graficzne przedstawienie zachowań dynamicznych obiektu w warunkach eksploatacyjnych. Danymi wejściowymi do systemu są przebiegi czasowe drgań mechanicznych, występujących w węzłowych punktach obiektu, odniesione do jednego z nich (o najwyższej amplitudzie). Wyznaczane są widma mocy własne $G_{xx}(j, \varpi)$ i widma mocy wzajemne odpowiedzi $G_{yy}(j, \varpi)$, przy czym punkt "x" obiektu jest punktem odniesienia, a punkty "y" są węzłowymi punktami obiektu.

Obecnie coraz częściej stosuje się modele modalne do oceny stanu destrukcji materiałów budowlanych konstrukcji. Ideą tej metody jest śledzenie zmian parametrów modelu (w tym przypadku modelu modalnego), powstających na skutek zużycia lub awarii, na podstawie bieżących obserwacji obiektu. W metodzie tej tworzy się model modalny dla obiektu bez uszkodzenia, jako wzorzec, a następnie w czasie eksploatacji identyfikuje się model modalny i bada jego korelację z modelem dla obiektu nieuszkodzonego. W przypadku, gdy korelacja taka występuje, można twierdzić, że obiekt jest w stanie bez uszkodzenia. W przypadku braku korelacji można spodziewać się uszkodzenia obiektu. Dysponując informacjami o wpływie danego uszkodzenia na parametry modelu modalnego, można określić jego rodzaj oraz ocenić ilościowo stopień uszkodzenia.

Przedstawione zastosowania analizy modalnej do rozwiązywania zagadnień badawczych i inżynierskich wskazują na uniwersalność i efektywność tej metody, która jak do tej pory nie знаła szerszego zastosowania w praktyce polskich biur projektowych, czy jednostek badawczych. Na świecie w większości krajów o rozwiniętej technologii stanowi ona podstawowe narzędzie syntezy i analizy dynamicznej konstrukcji.

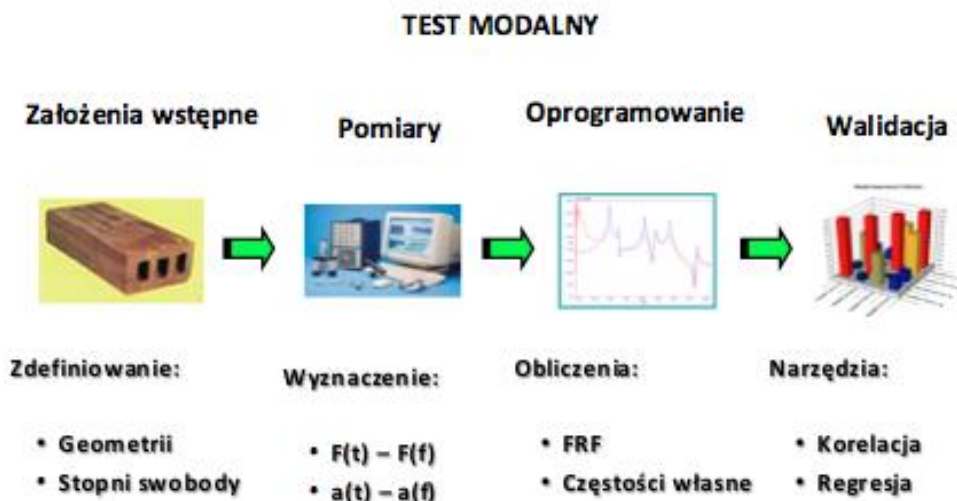
Eksperyment w analizie modalnej

Eksperyment w identyfikacji stanu destrukcji badanych elementów murowych jest podstawowym źródłem informacji i na jego podstawie ustala się wartości miar i strukturę modelu. Z jednej strony od jakości wyników badań eksperymentalnych zależy jakość otrzymanego modelu, z drugiej zaś sposób przeprowadzenia

eksperymentu determinuje strukturę, identyfikowanego modelu. Eksperyment w analizie modalnej można podzielić na następujące etapy:

- 1) Planowanie eksperymentu:
 - wybór sposobu wymuszania drgań badanych elementów i punktów przyłożenia,
 - wybór punktów pomiaru drgań i aparatury pomiarowej,
 - wybór odpowiedniego sprzętu pomiarowego,
 - wybór sposobu zawieszenia układu.
- 2) Kalibracja toru pomiarowego.
- 3) Akwizycja i przetwarzanie wyników eksperymentu.

Celem eksperymentu w analizie modalnej jest wymuszenie ruchu badanego elementu murewego oraz pomiar odpowiedzi na zadane wymuszenie. Na podstawie zmierzonych wielkości procesu drganiowego dokonywana jest estymacja jego charakterystyk dynamicznych. Ogólną procedurę realizacji badań tej pracy pokazano na rys.4.



Rys.4. Przebieg procedury realizacji badań w analizie modalnej

Badany element murewy poddany wymuszeniu siłowemu odpowiada sygnałem drganiowym, proporcjonalnym do stanu destrukcji. Sygnał wymuszenia i odpowiedzi wykorzystuje się dalej do wyznaczenia funkcji *FRF* i diagramu stabilizacyjnego, a w nim częstości drgań własnych. Przy okazji realizacji tych procedur są dostępne inne ciekawe poznawczo estymatory procesów drganiowych, które także wykorzystuje się w dalszych badaniach. Wyniki badań po przetworzeniu według różnych algorytmów poddaje się opracowaniu statystycznemu.

Typowy zestaw aparatury do realizacji eksperymentu w analizie modalnej składa się z następujących elementów:

- układu pomiaru wymuszenia ruchu i pomiaru odpowiedzi,
- układu kondycjonowania sygnałów (wstępnego przetwarzania),
- układu przetwarzania i zbierania sygnałów,
- układu generowania sygnału wymuszającego,
- układu wzbudzania drgań.

Najprostszym ze względu na obsługę rozwiązaniem jest zastosowanie analizatora sygnałów, natomiast najnowocześniejszym, dającym największe możliwości jest rozwiązanie oparte na stacji roboczej i specjalizowanym interfejsie pomiarowym. Podstawową operacją wykonywaną przez wszystkie stosowane w analizie modalnej przyrządy pomiarowe jest przetwarzanie analogowo-cyfrowe, które umożliwia stosowanie technik cyfrowego przetwarzania sygnałów do wyznaczenia wymaganych przez analizę modalną estymatorów charakterystyk.

W badaniach modalnych jest obojętne, którą z wielkości kinematycznych ruchu mierzymy jako odpowiedź układu. W praktyce jednak pomiary przemieszczenia dają lepsze rezultaty w zakresie niskich częstotliwości, a przyspieszenia w zakresie częstotliwości wysokich. Powszechnie uważa się, że pomiary prędkości są najbardziej optymalne w badaniach dynamiki konstrukcji ze względu na to, że wartość skuteczna prędkości drgań jest w pewnym sensie miarą energii kinetycznej drgań układu. Jednak czujniki do pomiaru przemieszczeń i prędkości są stosunkowo ciężkie i mogą wpływać na zachowanie się badanego obiektu.

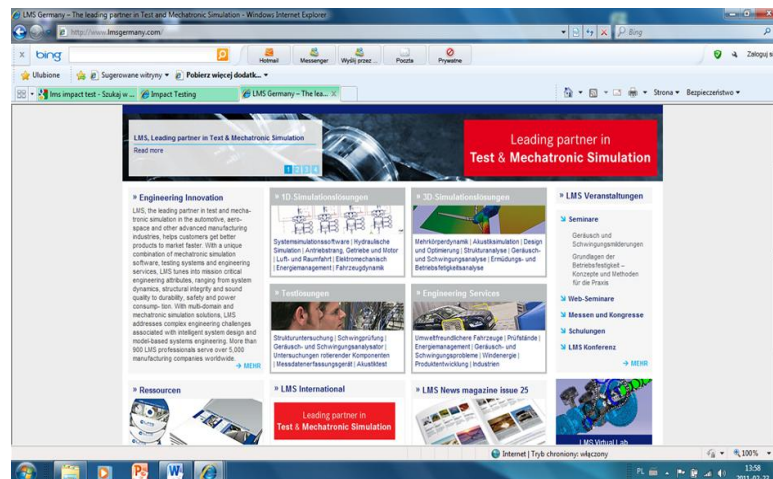
Czujniki przyspieszeń mają znacznie mniejszą masę i dzięki temu nie wpływają na ruch układu. Dodatkową zaletą zastosowania czujnika przyspieszeń jest fakt, że z sygnału przyspieszenia przez całkowanie można otrzymać sygnał prędkości lub przemieszczenia drgań. Operacja w drugą stronę, polegająca na różniczkowaniu, może prowadzić do dużych błędów, szczególnie w zakresie wyższych częstotliwości. Z powyższych względów czujniki przyspieszeń są najczęściej stosowanymi przetwornikami do realizacji badań modalnych konstrukcji. Czujniki przyspieszeń zbudowane na bazie zjawiska piezoelektrycznego można zamodelować jako układ o jednym stopniu swobody z tłumieniem. Masa w tym modelu jest masą sejsmiczną obciążającą kryształ materiału piezoelektrycznego w czasie ruchu. Ze względu na konstrukcję czujniki mają swój rezonans, co ogranicza pasmo częstotliwości, w którym mogą być zastosowane.

Bardzo ważnym czynnikiem, mającym wpływ na wyniki badań modalnych, związanym z czujnikami jest wybór miejsca zamocowania czujnika. Czujniki powinny być zamocowane w taki sposób, aby nie wpływały na drgania układu oraz były zamocowane w punktach charakterystycznych dla zachowania się konstrukcji. Obecnie coraz częściej do pomiarów drgań w czasie badań modalnych konstrukcji stosuje się czujniki bezstykowe. Jedną z możliwości realizacji tego typu czujników jest wykorzystanie promienia laserowego. Czujniki tego typu umożliwiają pomiar prędkości drgań w zakresie częstotliwości od 0 do 50 kHz oraz w zakresie amplitud od 0 do 100 mm/s.

Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na zakres mierzonych częstości ma sposób zamontowania czujnika do badanej konstrukcji. Czujniki można przymocować do badanej konstrukcji za pomocą specjalnego wosku, kleju (30kHz), magnesu (7kHz) lub przykręcić za pomocą śruby (30kHz). Metoda LSCE została zaimplementowana w programie „VIOMA” służącym do przeprowadzenia operacyjnej analizy modalnej [22,25]. W metodzie tej impulsowa funkcja przejścia zastępowana jest funkcją korelacji wzajemnej, której przebieg aproksymowany jest sumą zanikających wykładniczo funkcji harmoniczných. Algorytm składa się z dwóch kroków: w pierwszym zidentyfikowane zostają bieguny układu, w drugim na ich podstawie estymowane są postacie drgań własnych układu. Początkowo badany obiekt zostaje zamodelowany wielomianami o określonych rzędach minimalnym i maksymalnym oraz krokiem estymacji. Im większy maksymalny rząd wielomianu, tym lepiej model będzie oddawał rzeczywistą konstrukcję, ale także znacznie wzrośnie złożoność i czas wykonania obliczeń. Na podstawie wybranych biegunów układu następuje estymacja postaci drgań.

4. Oprogramowanie pomiarowe

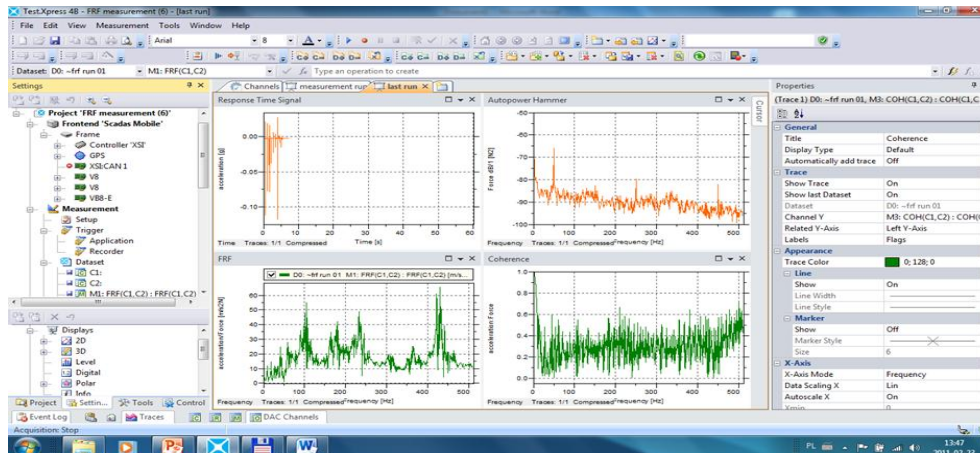
Do pomiarów funkcji przejścia sygnału przez istniejącą konstrukcję (funkcja cross-korelacji) i wygenerowania na jej podstawie diagram stabilizacyjnego wykorzystano najnowocześniejszą aparaturę pomiarową firmy LMS pod nazwą LMS TEST.XPRESS. Oprogramowanie to umożliwia w łatwy sposób przeprowadzić analizę modalną całych infrastruktural budowlanych. Program posiada łatwy i przyjemny interfejs przyjazny dla użytkownika - rys.5.



Rys.5. Witryna internetowa producenta oprogramowania

Kolejnym krokiem było zdefiniowanie systemu we wszystkie dane potrzebne do kalibracji toru pomiarowego - rys.6.

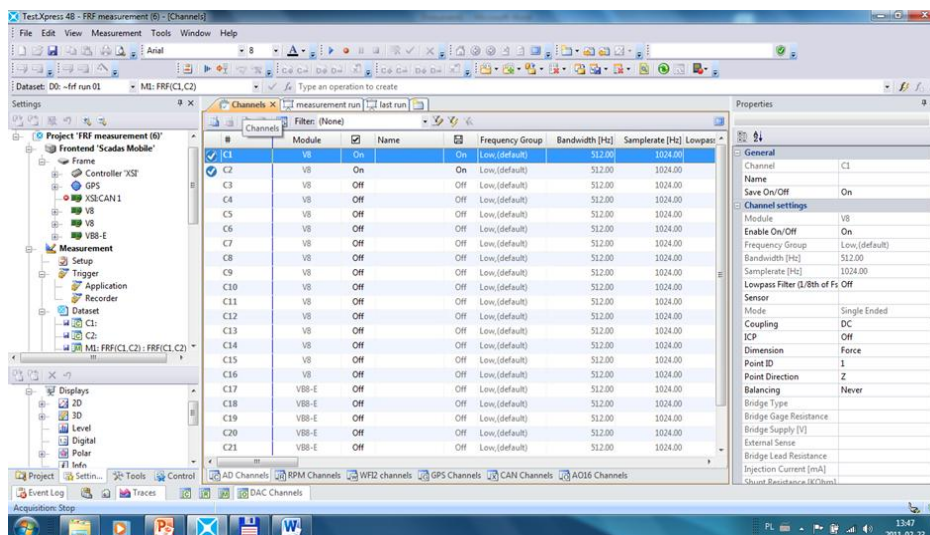
*The reliability testing of brick infrastructure with operating modal analysis
Badanie niezawodności infrastruktury murowej z użyciem....*



Rys.6. Interfejs programu LMS

Na potrzeby badań zdefiniowano 8 kanałów pomiarowych. Zgodnie z założeniami teoretycznymi eksploatacyjnej analizy modalnej pierwszy czujnik odpowiedzi zdefiniowano jako czujnik referencyjny, a kolejne 7 jako czujniki odpowiedzi konstrukcji. Dzięki temu można było wyznaczyć funkcje cross - korelacji przejścia sygnału przez badaną konstrukcję.

Na rys.7 pokazano okno kalibracji segmentu i zdefiniowane miejsca i sposób (rys.8) podłączenia czujników. Właściwości każdego z czujników, który podłączamy do segmentu definiujemy w oknie widocznym po prawej stronie na rys.7. Znajdują się tam wartości charakterystyczne czujników, które w miarę potrzeb możemy zmieniać.



Rys.7. Kalibracja miejsca podłączenia czujników



Rys.8. Podłączanie czujników pomiarowych



Rys.9. Widok rozstawionej aparatury badawczej

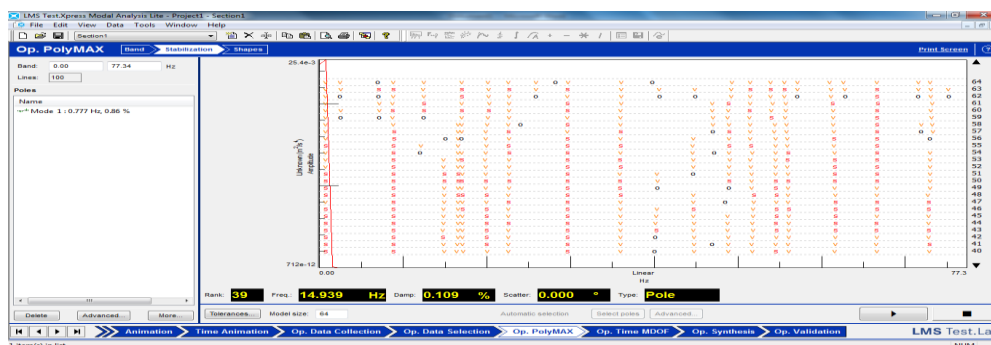
Następnym krokiem było zamodelowanie badanej konstrukcji i rozstawienia czujników w czasie pomiarów. Oprogramowanie LMS i młotek modalny (rys.9) umożliwiają modelowanie i wariantowanie badań konstrukcji. Poniżej przedstawiono zdjęcia rzeczywistych badanych konstrukcji. Badania przeprowadzono na istniejącej konstrukcji budowlanej. Był nią mur ceglany o grubości 0,18m i wysokości $h=2,00\text{m}$. Konstrukcję murową badano w miejscu uszkodzenia – rys.10, które generowało spadek naprężeń i groziło bezpieczeństwu konstrukcji. Dla porównania badano także konstrukcje murową w miejscu uznanym za prawidłowy stan konstrukcji.



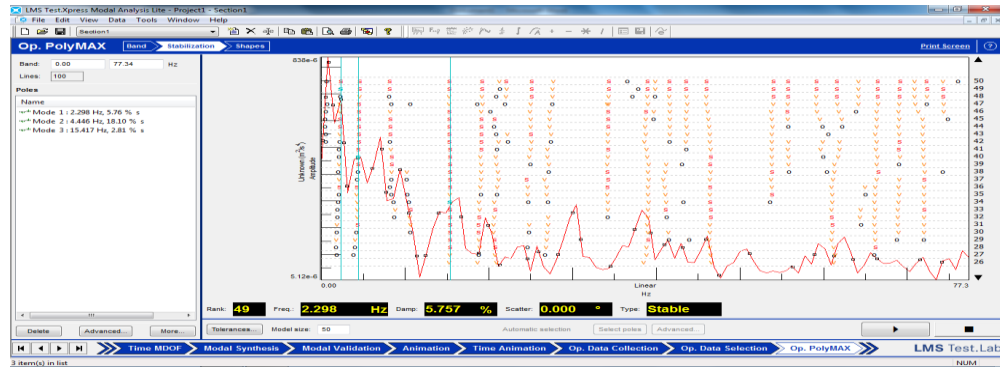
Rys.10. Widok uszkodzonej konstrukcji murowej

5. Wyniki badań

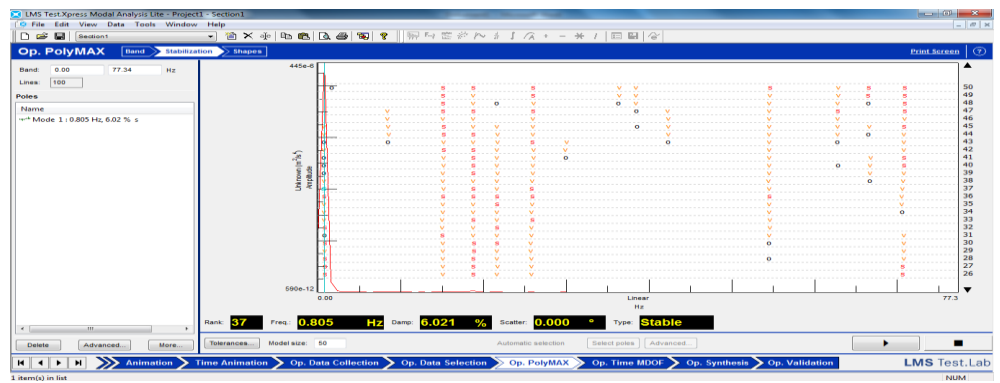
W czasie badań wygenerowano funkcje cross - korelacji pomiędzy punktem referencyjnym (czujnik C1), którego umiejscowienie narzuca nam teoria związana z eksploatacyjną analizą modalną, a 7-ma czujnikami rozmieszczonymi na konstrukcji. Dzięki wygenerowaniu funkcji cross-power spectrum w dalszym etapie możliwe jest wygenerowanie z niej diagramów stabilizacyjnych i częstości drgań własnych. Można tu zauważyć różnice między dwoma rodzajami analizy modalnej. W eksperymentalnej analizie modalnej diagramy stabilizacyjne są generowane z przebiegu funkcji FRF, (wymuszenie - odpowiedź), a w eksploatacyjnej (odpowiedź w punkcie referencyjnym do odpowiedzi w punktach mocowania czujników). Dla zobrazowania zmian w konstrukcji (gdyż są to pierwsze badania tego typu) wykonano pomiary w kilku wariantach. Po pierwsze były to badania konstrukcji zdatnej i niezdatnej, bez ingerencji z zewnątrz. Badania porównawcze dla konstrukcji zdatnej i niezdatnej prowadzono przy jednoczesnym wymuszeniu drgań - poprzez rytmiczne pukanie w konstrukcję, co trwało każdorazowo 30 sekund. Poniżej przedstawiono wyniki badań w postaci wizualizacji diagramów stabilizacji i odkształceń zachodzących w konstrukcji.



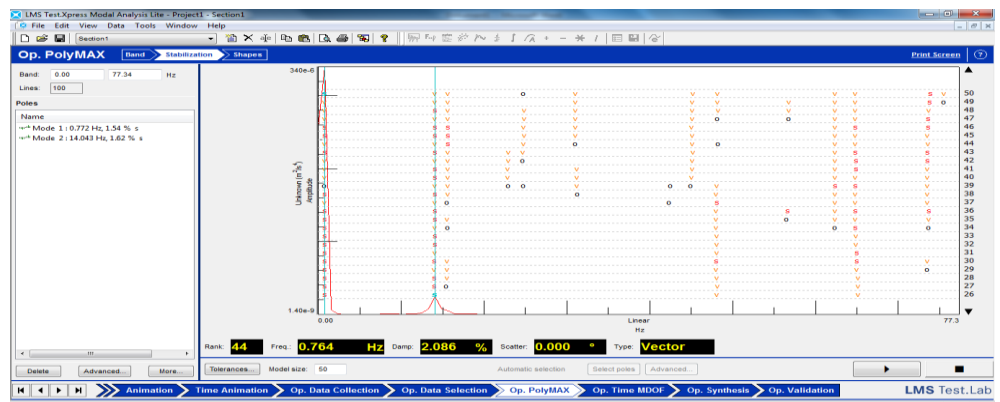
Rys.11. Diagram stabilizacyjny dla zdatnego muru ceglanego (OAM)



Rys.12. Diagram stabilizacyjny dla uszkodzonego muru ceglano (OAM)



Rys.13. Diagram stabilizacyjny dla sztywnego muru z wymuszeniem drgań (OAM)



Rys.14. Diagram stabilizacyjny dla uszkodzonego muru z wymuszeniem drgań (OAM)

Poniżej przedstawiono tabelaryczne zestawienie częstości drgań własnych wygenerowanych dla pomiarów istniejącej konstrukcji murowej – tablica1.

Tablica 1. Zestawienie częstości drgań własnych w czasie badań konstrukcji muru ceglanego

WYMUSZENIA	Element zdalny	Element uszkodzony
z wymuszeniem EAM	865,612Hz	1025,813Hz 1060,857Hz 1112,476Hz 1121,607Hz
bez wymuszenia OAM	0,777Hz	2,289Hz 4,446Hz 15,417Hz
z wymuszeniem OAM	0,805HZ	0,772Hz 14,043Hz

6. Wnioski

Przedstawione wyniki badań wskazują na fakt, że istnieje możliwość rozróżniania własności materiałowych konstrukcji budowlanych metodami analizy modalnej, co ma wpływ na możliwość rozróżniania stopnia ich degradacji.

Badania również potwierdziły przydatność aparatury i oprogramowania LMS do badań z eksploatacyjnej analizy modalnej wykonywanych na rzeczywistych konstrukcjach budowlanych.

Z przedstawionych wyników można wyprowadzić następujące wnioski:

- badania częstości drgań własnych i ich graficzne przedstawienie ukazują różnice pomiędzy konstrukcją zdątną i uszkodzoną;
- wygenerowano częstości drgań własnych dla konstrukcji muru zdątnego (1Hz), a dla uszkodzonego muru możliwe było wygenerowanie kilku częstości drgań własnych (4,45Hz, 14,04Hz, 15,42Hz);
- można zauważyć, że stan zdątny konstrukcji jest opisany jedną częstością drgań własnych, a stan konstrukcji uszkodzonej można opisać za pomocą trzech i więcej częstościami własnymi;
- możliwe jest określenie stanu zagrożenia konstrukcji na podstawie badanych częstości drgań własnych, co wymaga jednak wielu eksperymentów dla przyjęcia poziomów zdątności.

7. Bibliografia

- [1] Ameliańczyk A.: Optymalizacja wielokryterialna w problemach sterowania i zarządzania. Ossolineum, Wrocław 1984.
- [2] Bendat J. S., Piersol A. G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. PWN, Warszawa 1976.
- [3] Brunarski L.: Określenie klasy betonu na podstawie diagnostycznych badań konstrukcji. Konferencja Ustroń - Gliwice 1998.
- [4] Brunarski L.: Ocena wytrzymałości betonu w konstrukcji. Kwartalnik Prace Instytutu Techniki Budowlanej, nr 2-3/1998.
- [5] Brunarski L.: Nieniszczące metody badania betonu. Arkady, Warszawa 1996.
- [6] Ciesielski R.: Diagnostyka dynamiczna w budownictwie. Przegląd Budowlany, nr1/1993.
- [7] Ciesielski R.: Nowe możliwości analizy i diagnostyki budowli zabytkowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 9/1998.

- [8] Ciesielski R.: Wpływ obciążeń dynamicznych na konstrukcje murowe. Warsztat pracy projektanta konstrukcji, Ustroń 1999.
- [9] Ciesielski R. ii: Przypadki oceny a posteriori wpływów parasejsmicznych na budowlę. Konferencja: Awarie Budowlane, Szczecin - Międzyzdroje 1995.
- [10] Chmielewski T., Zembaty Z.: Podstawy dynamiki budowli. Wydawnictwo ARKADY, Warszawa 1998.
- [11] Chmielewski T., Nowak H.: Mechanika budowli. WNT, Warszawa 1996.
- [12] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Lokalizacja wad konstrukcji i stali zbrojeniowej - metody. XXI Konferencja, Szczyrk 2006.
- [13] Der Kiureghian A.: A response spectrum method for random vibrations. Rep. No. UCB/EERC-80-15, Earth. Eng. Research Center, Univ. of California, Berkeley 1980.
- [14] Giergiel J., Uhl T.: Identyfikacja układów mechanicznych. PWN, Warszawa, 1990.
- [15] Giergiel J.: Drgania mechaniczne. AGH, Kraków 2000.
- [16] Godyeki – Cwirko T, Mielczarek Z.: O badaniach i stosowaniu konstrukcji drewniano – żelbetowych. Inżynieria i Budownictwo, 5/1997.
- [17] Gromysz K. i inni: Nowoczesne metody diagnostyki konstrukcji żelbetowych. Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń 2002.
- [18] Łukasiewicz M.: Badania przydatności eksploatacyjnej analizy modalnej w diagnozowaniu silników spalinowych. Rozprawa doktorska, UTP Bydgoszcz, 2008.
- [19] Moczko A.: Nowe metody nieniszczącej diagnostyki konstrukcji betonowych. INWITU, Zakopane 1999.
- [20] Podhorecki A.: Diagnostyka budynków i budowli. PTDT - ITEE, Rozdział 16 w Inżynierii Diagnostyki Maszyn, Radom 2004.
- [21] Runkiewicz L.: Stosowanie metod nieniszczących do oceny materiałów przy certyfikacji obiektów budowlanych. Konferencja Badań Nieniszczących, Poznań - Licheń 2004.
- [22] Runkiewicz L.: Stosowanie metod nieniszczących w kontroli produkcji wyrobów i elementów budowlanych. Konferencja Badań Nieniszczących, Zakopane 2005.
- [23] Runkiewicz L., Rodzik W.: Badania nieniszczące wytrzymałości murowanych obiektów zabytkowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 2/1990.
- [24] Uhl T.: Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych. WNT, Warszawa 1997.
- [25] Uhl T., Lisowski W.: In-operation modal analysis. Wydawnictwo KRiDM AGH, Kraków, 2001.
- [26] Uhl T.: Zastosowanie modeli dynamicznych układów mechanicznych w systemach monitorowania i diagnozowania stanu maszyn, V Conference on Dynamical Systems Theory and Applications, Łódź 1999.
- [27] Uhl T.: Diagnostyka przez identyfikacje, Konferencja Diagnostyka Pojazdów, Bydgoszcz 1996.
- [28] Uhl T.: Zastosowanie analizy modalnej w diagnostyce konstrukcji, Diagnostyka vol.23, 2000.
- [29] Uhl T., Lisowski W.: Eksploatacyjna analiza modalna i jej zastosowania, Akademia Górniczo - Hutnicza Kraków 1999.
- [30] Uhl T., Lisowski W.: Praktyczne problemy analizy modalnej konstrukcji, CCATIE, Kraków 1996.

- [31] Żółtowski M.: Selection information on identification the state machine. UWM, Acta Academia 310, Olsztyn 2007.
- [32] Żółtowski M.: Badania destrukcji wybranych materiałów. Materiały konferencji, REGENERACJA '06. Bydgoszcz 2006.
- [33] Żółtowski M.: Komputerowe wspomaganie zarządzania systemem eksploatacji w przedsiębiorstwie produkcyjnym. Zintegrowane zarządzanie. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole t. 2. 2011. s. 243-257.
- [34] Żółtowski M.: Badania materiałów budowlanych w aspekcie bezpieczeństwa konstrukcji. Materiały konferencyjne. Częstochowa 2010.
- [35] Żółtowski M.: Informatyczne systemy zarządzania w inżynierii produkcji. ITE-PIB Radam 2011.
- [36] Żółtowski M.: Analiza modalna w badaniu materiałów budowlanych. ITE-PIB, Radom 2011.

Pracę wykonano w ramach projektu POIG nr. WND-POIG.01.03.01-00-212/09