
PRACE NAUKOWE GIG GÓRNICITWO I ŚRODOWISKO	RESEARCH REPORTS MINING AND ENVIRONMENT
Kwartalnik	Quarterly

3/2005

Andrzej Staniek

METODA IDENTYFIKACJI CIĄGŁOŚCI WKLEJENIA ŻERDZI KOTWIOWYCH W GÓROTWORZE

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę identyfikacji nieciągłości wklejenia żerdzi kotwionych w górotworze. Metoda polega na wymuszeniu drgań badanego obiektu młotkiem udarowym i eksperymentalnej analizie modalnej. Otrzymane częstotliwości własne porównywane są z wynikami teoretycznej analizy modalnej realizowanej na modelu elementów skończonych badanego obiektu dla różnych warunków brzegowych odpowiadających różnym przypadkom nieciągłości wklejenia. Omówiono wyniki badań prowadzonych w warunkach stosowania obudowy kotwionej dla przypadków o znanej i nieznannej długości wklejenia. Przeprowadzono również analizę statystyczną otrzymanych wyników oraz przedstawiono wnioski końcowe.

Method for identification of continuity of resin layer of rock bolts

Abstract

A rock bolt which is grouted underground may not be properly inserted with the result of discontinuity of a cement layer surrounding it. Such discontinuity may also occur in working conditions due to typical rock behavior and displacement. It may be very hazardous to mine safety.

In this paper a method for non-destructive identification of discontinuity of a resin layer surrounding rock bolt is presented. The method uses modal analysis procedures and is based on an impact excitation where a response transducer is positioned at a visible part of a rock bolt. As an installed rock bolt acts as an oscillator, different length of discontinuity of resin layer changes its modal parameters. By proper extraction of these parameters, from which a resonant frequency is seen as most valuable, the intended identification is possible. At the first phase of research work measurements and analyses were performed in laboratory conditions on models with different types of discontinuity of a cement layer. A special stand was prepared and rock bolts were grouted into cement cylinders of different lengths and clinched to a 20-t foundation. Though there was a good correlation between obtained results, quite large interaction with supporting elements was observed. Not being unexpected it proved that such laboratory conditions can not be used as a reference for in situ measurements. What also was gained from laboratory measurements and analysis was the fact that most significant role in identification of different lengths of discontinuity of a resin layer, which form boundary conditions, play natural frequencies. Damping does not convey satisfactory information on that subject and may vary to a certain degree from sample to sample overshadowing its proper usefulness. Since tests in real conditions must be performed on relatively short length of a rock bolt, a mod shape usage was also constrained.

One of the obstacles in making in situ measurements, especially in severe mine conditions, is lack of a relatively low cost apparatus used for acquiring and recording data. These severe conditions are frequently met in coal mines where rock bolts are installed to support roof strata. Because of this inventing and constructing of a portable measurement system was realized. As a programming tool the LabVIEW program was used and as hardware a DAQ card installed on a laptop platform and worked out conditioning signal unit were introduced to the measurement chain.

As a continuation of laboratory measurements and analysis relevant tests were performed at an experimental coal mine underground. One of technical problems was proper insertion of a rock bolt into a drill hole with known length and placement of its discontinuity. After overcoming this obstacle underground tests were realized and through relevant analysis the modal parameters, especially natural frequencies, were derived. The experimental setup is shown in Figure 3.

It was found that proper identification of the natural frequencies of a grouted rock bolt is a key point in determining a position and length of the discontinuity of a resin layer. But what is also needed is a reference point, with which our results may be compared. With this aim theoretical modal analysis was introduced (Ewins, Silva, Uhl) and a database of Finite Element (FE) models with different types of resin discontinuity (different boundary conditions) was built. Then process of reconciliation of these two groups of models was undertaken and comparison between relevant known cases of discontinuities was made. An example of a Finite Element model and an analytical mode shape for such boundary conditions are presented in Figure 9. As there are many problems connected with proper reconciliation, exact experimental estimation of the physical properties of structural materials, including rock properties, was done.

At the final stage many tests on unknown cases of discontinuity of a grout layer were performed. Satisfactory results were obtained.

To sum up, the method consists mainly of two parts: proper derivation of modal parameters of an examined rock bolt, with natural frequencies seen as most valuable, and comparison with the data base of Finite Element models. The observed conclusions are: close relation between modal parameters and boundary conditions of tested structures exists, satisfactory repeatability for the same cases of discontinuity was obtained.

WPROWADZENIE

W światowym górnictwie węglowym obudowa kotwiowa stanowi podstawę bezpiecznego utrzymywania wyrobisk korytarzowych. Wśród liczących się producentów węgla wydobywanego sposobem podziemnym: USA, RPA i Australii, jest ona praktycznie jedyną stosowaną obudową wyrobisk korytarzowych. Obudowa kotwiowa jest coraz częściej stosowana w innych krajach, w tym także w Polsce.

Powszechniejsze stosowanie obudowy kotwiowej jest spowodowane rozwojem przemysłu wytwarzającego zmechanizowany sprzęt do kotwienia, przede wszystkim lekkie kotwiarki pneumatyczne i hydrauliczne, wozy kotwiąco-podporowe, a także szeroki asortyment kotwi stalowych. Innym, istotnym powodem stosowania obudowy kotwiowej, szczególnie w skałach słabych, dotychczas tradycyjnie podtrzymywanych obudową podporową, jest wprowadzanie do użytku ładunków klejowych na bazie żywic poliestrowych do osadzania kotwi w górotworze.

Niezależnie od metod projektowania i sposobów wykonywania obudowy kotwiowej, podstawowe znaczenie, z uwagi na bezpieczeństwo, ma kontrola pracy jej parametrów. W przeciwieństwie bowiem do obudowy podporowej, która może być w każdej chwili, po zabudowaniu, sprawdzona wizualnie oraz poddana testom, istotna – tj. umieszczona w odwiercanych otworach – część konstrukcji obudowy kotwiowej jest niewidoczna dla obserwatora znajdującego się w wyrobisku. W związku z tym sprawdzenie wszystkich jej elementów jest albo niemożliwe, albo bardzo uciążliwe. Obecnie powszechnie są stosowane następujące trzy rodzaje kontroli pracy obudowy kotwiowej:

- sprawdzenie na powierzchni typu i jakości prętów, terminu ważności użytego spoiwa (ładunku klejowego), a następnie po zamocowaniu kotwi kontrolę wizualną jakości zamocowania zewnętrznych części obudowy, rozstawu i usytuowania kotwi,
- kontrolę parametrów pracy obudowy kotwiowej, polegającą na pomiarze nośności nominalnej kotwi oraz, w przypadku zamocowania odcinkowego, próbnego obciążenia kotwi,
- kontrolę stateczności wyrobiska – badanie rozwarstwienia skał stropowych lub zaciskania wyrobiska.

W praktyce górniczej, mimo istniejących na rynku bardzo dobrych spoiw, w następstwie: rozwarstwienia skał, przenikania kleju do szczelin, sedymentacji cementu, pracy górotworu, żerdź kotwiowa bardzo często nie jest związana mechanicznie z górotworem na całej swojej długości. W takiej sytuacji nie wiadomo, czy zamocowana kotew pełni swoją funkcję właściwie i jaka miąższość skały jest faktycznie przez nią związana, konsekwencją czego może być zawalenie się stropu.

Na podstawie analizy literatury można stwierdzić, że skuteczna metoda kontroli ciągłości wklejenia żerdzi kotwiowej w górotworze nie została jeszcze opracowana. Nie jest więc kontrolowany podstawowy czynnik wpływający na pracę obudowy kotwiowej, a tym samym na stabilność wyrobiska i bezpieczeństwo pracy załogi.

1. TEORETYCZNE PODSTAWY PROWADZONYCH BADAŃ

Właściwości dynamiczne struktur mechanicznych mają charakter wielkości rozproszonych w przestrzeni. Te właściwości to masa, sztywność mechaniczna oraz tłumienie, od których jest uzależniona bezwładność, siły sprężystości oraz tarcie. Opis wzajemnego oddziaływania wszystkich właściwości mechanicznych badanej struktury mechanicznej na podstawie modelowania rzeczywistej struktury mechanicznej jest przedsięwzięciem bardzo złożonym lub wręcz niemożliwym. Jednakże, w większości przypadków, satysfakcjonujące rezultaty mogą być osiągnięte, jeżeli podstawowe właściwości złożonej struktury są rozpatrywane jako suma cech zbioru prostych elementów dyskretnych, na które ta struktura może być podzielona, a które właściwie powiązane mogą reprezentować z zadawalającą dokładnością jej charakterystyki dynamiczne.

1.1. Model modalny

Jedną z metod analizy właściwości mechanicznych struktur lub układów mechanicznych jest analiza modalna. Może być ona stosowana, jeżeli są spełnione następujące założenia (Uhl 1997):

- spełniona jest zasada liniowości, a więc dynamika może być opisana za pomocą liniowego układu równań różniczkowych,
- współczynniki równań opisujących dynamikę są niezmiennie w czasie pomiarów,
- badana struktura jest obserwowalna i istnieje możliwość pomiaru charakterystyk, których znajomość jest niezbędna do identyfikacji modelu,
- spełniona jest zasada wzajemności Maxwella, tzn. odpowiedź w i -tym punkcie na wymuszenie w j -tym punkcie jest równa odpowiedzi w j -tym punkcie na to samo wymuszenie w i -tym punkcie,
- tłumienie jest małe lub proporcjonalne.

Ostatni warunek jest istotny, gdy są stosowane metody identyfikacji parametrów modalnych dla jednego stopnia swobody, natomiast w praktyce w przypadku struktur silnie tłumionych identyfikacja modelu jest możliwa przez zastosowanie technik bazujących na metodzie najmniejszych kwadratów.

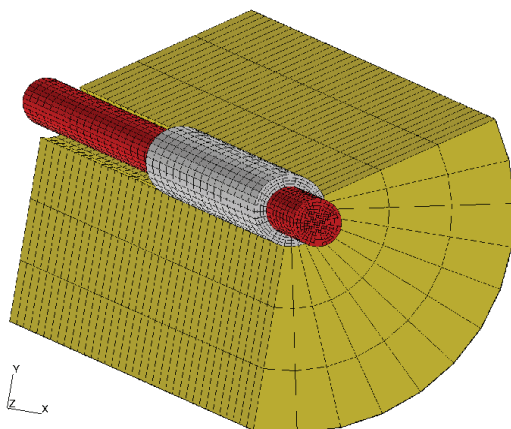
Model modalny jest zdefiniowany jako zbiór częstotliwości drgań własnych, współczynników tłumienia dla tych częstotliwości oraz postaci drgań (wektorów

modalnych). Wielkości te można otrzymać z modelu strukturalnego układu przez rozwiązanie zagadnienia własnego dla macierzy mas, tłumienia i sztywności mechanicznej. Stąd też często analizę modalną definiuje się jako rozwiązanie zagadnienia własnego dla badanej struktury mechanicznej.

1.2. Układy o wielu stopniach swobody

Podstawowym pojęciem związanym z analizą modalną jest liczba stopni swobody. Jest to minimalna liczba niezależnych współrzędnych, których znajomość jest konieczna do opisanego położenia układu w przestrzeni. Dla przykładu, liczba stopni swobody dla bryły sztywnej wynosi 6: trzy stopnie związane z przesunięciami wzdłuż poszczególnych osi układu współrzędnych oraz trzy związane z obrotami wokół tych osi. Każdy układ mechaniczny może być traktowany jako zbiór nieskończonej liczby małych brył sztywnych, z tego też względu może być on traktowany jako układ o nieskończonej liczbie stopni swobody. W praktyce wszystkie układy aproksymuje się układem o skończonej liczbie stopni swobody. Jest to konsekwencją budowy modeli układów mechanicznych, na podstawie których analizuje się ich ruch w określonym zakresie częstotliwości. Od liczby stopni swobody jest zależny wymiar macierzy mas, sztywności i tłumienia, jak również liczba teoretycznych częstotliwości drgań własnych i postaci drgań (Byron, Fuller 1975, Uhl 1997, Remington 1997). W praktyce stosuje się również modele zredukowane, w których zmniejszenie liczby stopni swobody wiąże się ze zmniejszeniem wymiaru macierzy mas, sztywności i tłumienia. Jednakże, taka redukcja nie może ograniczać się jedynie do eliminacji wybranych kolumn i wierszy macierzy mas, sztywności i tłumienia, gdyż w konsekwencji otrzymany układ miałby inne właściwości mechaniczne, lecz do redystrybucji parametrów opisujących masę, sztywność i tłumienie z zredukowanych wierszy i kolumn do pozostałych. Bardziej trafnym określeniem jest więc kondensacja macierzy.

Przykład układu o wielu stopniach swobody, który stanowi pręt stalowy (żerdź kotwiowa) przytwierdzony na określonym odcinku do górotworu z wykorzystaniem żywicy poliestrowej (wklejenie formułuje określone warunki brzegowe) przedstawiono na rysunku 1. Przypadek taki był analizowany w czasie prowadzonych badań.

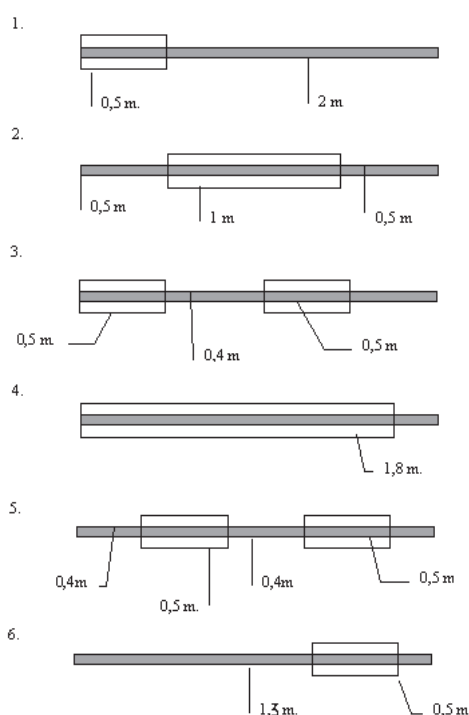


Rys. 1. Układ o wielu stopniach swobody – drgający pręt stalowy (żerdź kotwiowa) z zaznaczonymi warunkami brzegowymi (przytwierdzenie na określonym odcinku do górotworu – kolor żółty, z wykorzystaniem żywicy poliestrowej – kolor biały)

Fig. 1. Multidimensional oscillator – vibrating rock bolt grouted into the rock on a certain length, that forms particular boundary conditions (resin layer – white colour, rock – yellow colour, rock bolt – red colour)

2. ANALIZA RÓŻNYCH PRZYPADKÓW NIECIĄGŁOŚCI WKLEJENIA ŻERDZI KOTWIOWYCH W WARUNKACH LABORATORYJNYCH

W celu zbadania możliwości identyfikacji ciągłości wklejenia żerdzi kotwionych utworzono specjalne stanowisko badawcze. Wykonano szereg cementowych walców o różnej długości z wydrążonym wzdłuż osi symetrii walca otworem o średnicy około 28 mm (typowa średnica odwiercanych otworów w warunkach rzeczywistych). Długości cementowych walców dobrano tak, aby umożliwiły wklejenie żerdzi na długościach: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ oraz na całej długości. Następnie przystąpiono do wklejenia żerdzi stosując typowy, popularnie stosowany w Polsce klej poliestrowy. Przygotowano w ten sposób różne kombinacje nieciągłości wklejenia, z których część pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Rodzaje badanych nieciągłości wklejeń (przykłady)
Fig. 2. Different cases of measured resin discontinuities (examples)

2.1. Wnioski z badań laboratoryjnych

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych wyciągnięto następujące wnioski:

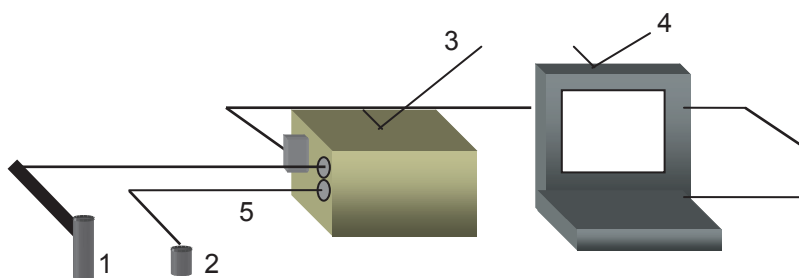
- zaproponowana metoda może być skuteczna do identyfikacji ciągłości wklejenia żerdzi kotwionych,
- w celu właściwego mocowania żerdzi (stwierdzono wady mocowania z wykorzystaniem imadeł) badania należało kontynuować w warunkach rzeczywistych stosowania obudowy kotwiovej (kopalnia doświadczalna, zakłady górnicze stosujące samodzielną obudowę kotwiovej),

- konieczne było skonstruowanie przenośnego systemu akwizycji danych pomiarowych zapewniającego rejestrację funkcji przejścia w warunkach, gdzie stosowana jest samodzielna obudowa kotwiowa,
- w celu identyfikacji odcinków nieciągłości należało opracować matematyczny model badanej struktury (model elementów skończonych) uwzględniający różne, badane eksperymentalnie przypadki nieciągłości wklejenia oraz przeprowadzić na tym modelu teoretyczną analizę modalną,
- wyniki analizy modalnej, zrealizowanej na modelu teoretycznym, mogą stanowić bazę odniesienia dla identyfikowanych nieznanymi przypadków po uprzednim dostrojeniu modeli eksperymentalnego i teoretycznego.

3. SYSTEM POMIAROWY UMOŻLIWIĄJĄCY REJESTRACJĘ I AKWIZYCJĘ DANYCH W WARUNKACH TERENOWYCH

W celu praktycznej realizacji wniosku wynikającego z badań laboratoryjnych opracowano i skonstruowano system pomiarowy, umożliwiający rejestrację i akwizycję funkcji przejścia (*Frequency Response Function*) badanych obiektów w warunkach terenowych.

Ze względu na konieczność równoczesnej dwukanałowej rejestracji sygnału analogowego (rejestracja funkcji przejścia) wybrano odpowiednią kartę DAQCard-6062E, 500 kS/s. Program komputerowy sterujący pracą systemu rejestracji i akwizycji danych opracowano w języku ikonicznym w środowisku LabVIEW. Równocześnie z tworzeniem programu określono założenia oraz wykonano dwukanałowy układ wzmacnienia i dopasowania sygnału, dostosowany do współpracy z piezoelektrycznymi przetwornikami drgań. Po sprawdzeniu działania programu zestawiono system pomiarowy, przedstawiony na rysunku 3, składający się z wykonanego, według własnej konstrukcji, dwukanałowego układu wzmacnienia i dopasowania sygnału sterowanego wspomnianym oprogramowaniem zapisanym w pamięci przenośnego komputera.

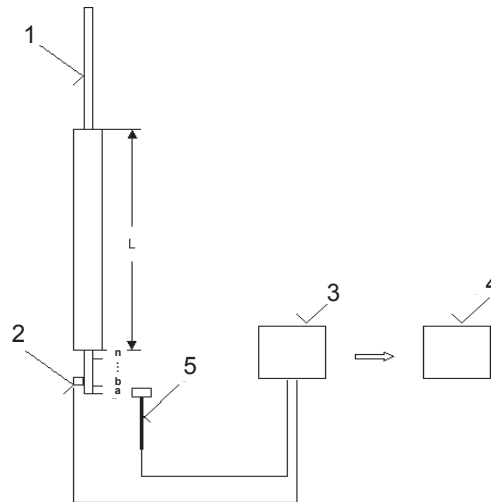


Rys. 3. Przenośny system pomiarowy dla akwizycji i rejestracji funkcji przejścia, pliki wejściowe dla eksperymentalnej analizy modalnej badanych struktur mechanicznych (żerdzi kotwiowych): 1 – młotek uderowy z przetwornikiem siły, 2 – przetwornik przyspieszenia drgań, 3 – układ wzmacnienia i dopasowania sygnału, 4 – komputer przenośny typu laptop, 5 – gniazdo 68 pin

Fig. 3. Portable unit for acquisition and recording of frequency response function (FRF), the source files for experimental modal analysis of tested mechanical structures (rock bolts): 1 – impact hammer with force transducer, 2 – accelerometer, 3 – conditioning unit, 4 – laptop computer, 5 – 68 pin socket

4. METODA IDENTYFIKACJI CIĄGŁOŚCI WKLEJENIA ŻERDZI KOTWIOWYCH ZAMOCOWANYCH W GÓROTWORZE

Metoda identyfikacji ciągłości wklejenia żerdzi kotwiowych w górotworze polega na wymuszaniu drgań badanego obiektu za pomocą młotka udarowego, wyposażonego w przetwornik siły umieszczony w głowicy młotka oraz równoczesną rejestrację sygnału wymuszenia, pochodzącego z przetwornika siły i sygnału odpowiedzi na to wymuszenie, pochodzącego z piezoelektrycznego przetwornika drgań. Kierunek wymuszenia jest prostopadły do osi symetrii żerdzi, oś główna przetwornika odbiorczego również jest prostopadła do osi symetrii żerdzi. Wymuszenie drgań odbywa się w kilku punktach na wystającym z górotworu odcinku żerdzi kotwiowej, przy określonym położeniu przetwornika odbiorczego umieszczonego na tym odcinku żerdzi. Sygnały rejestruje się sekwencyjnie dla każdej pary punktów pomiarowych, wykorzystując skonstruowany system akwizycji danych. Dane są zapisywane w postaci plików w formacie UF (*universal file*), a następnie importowane do programu realizującego analizę modalną w celu identyfikacji odpowiednich częstości własnych badanego obiektu, charakterystycznych dla danego rodzaju nieciągłości wklejenia. Otrzymane częstości własne są porównywane z wynikami teoretycznej analizy modalnej realizowanej na modelu elementów skończonych badanego obiektu dla różnych warunków brzegowych odpowiadających różnym przypadkom nieciągłości wklejenia. Układ pomiarowy stosowany w metodzie przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Układ pomiarowy: 1 – żerdź kotwiowa, 2 – przetwornik drgań, 3 – system akwizycji danych, 4 – stacja robocza dla analizy modalnej, 5 – młotek udarowy, a–n – punkty wymuszenia, L – długość wklejenia

Fig. 4. Experiment setup: 1 – rock bolt, 2 – accelerometer, 3 – portable measurement system, 4 – workstation for modal analysis, 5 – impact hammer, a–n – points excited, L – grouted length

Układ pomiarowy do akwizycji i rejestracji danych w warunkach rzeczywistych stosowania samodzielnej obudowy kotwiowej przedstawiono na zdjęciach 1 i 2.



Fot. 1. Przenośny system akwizycji i rejestracji funkcji przejścia – PSAR-FRF; realizacja badań w warunkach rzeczywistych stosowania samodzielnej obudowy kotwiowej

Foto. 1. Portable unit for acquisition and recording of frequency response function – PSAR-FRF, measurement in real working conditions where rock bolt support system is used



Fot. 2. Wymuszanie drgań młotkiem udarowym, sygnał odpowiedzi mierzony piezoelektrycznym przetwornikiem drgań

Foto. 2. Exciting of a rock bolt with an impact hammer, response of the impact measured with piezoelectric transducer

Zaletami metody jest: możliwość oceny ciągłości wklejenia w dowolnym momencie po zamontowaniu kotwi, niszczący charakter metody oraz brak konieczności instalacji oprzyrządowania w górotworze.

Jednym z podstawowych warunków realizacji metody jest identyfikacja modelu modalnego badanej struktury. Model modalny struktury mechanicznej składa się zasadniczo z dwóch macierzy:

- macierzy fundamentalnej zawierającej częstotliwości własne i współczynniki tłumienia drgań (parametry te są zawarte w wartościach własnych macierzy),
- macierzy modalnej zawierającej wektory własne drgań (postacie drgań).

Można więc konstruować model, zaczynając od identyfikacji pojedynczych wektorów modalnych, a bardziej złożony model (niekoniecznie kompletny) stanowiłyby zestawione razem współrzędne poszczególnych wektorów modalnych wraz z odpowiadającymi im częstotliwościami drgań własnych i współczynnikami tłumienia.

Z pojedynczej charakterystyki funkcji przejścia $H_{jk}(\omega)$, gdzie j, k oznaczają odpowiednio punkty wymuszenia i odpowiedzi, możliwe jest obliczenie: częstotliwości własnej, współczynnik tłumienia oraz reszty modalnej dla r -tego modu (Dossing 1988).

$$H_{jk}(\omega) \rightarrow \eta_r A_{jk}; \quad r = 1, m \quad (1)$$

gdzie: ω , η_r , A_{jk} , m – oznaczają odpowiednio częstotliwość drgań, współczynnik tłumienia, resztę modalną i liczbę modów drgań zidentyfikowanych w procesie analizy.

Aby otrzymać poszczególne elementy macierzy modalnej $[\Phi]$, czyli współrzędne wektorów modalnych ϕ_{jr} konieczne jest wykonanie serii pomiarów funkcji przejścia kolejno w różnych punktach badanej struktury mechanicznej. Szczególnie ważnym jest pomiar odpowiedzi bezpośrednio w punkcie wymuszenia. Można wtedy otrzymać składowe r -tego modu drgań, znając resztę modalną rA_{kk} w tym punkcie, na podstawie zależności

$$\phi_{jr}^2 = rA_{kk} \quad (2)$$

Pozostałe współrzędne wektora modalnego mogą być obliczone z równania

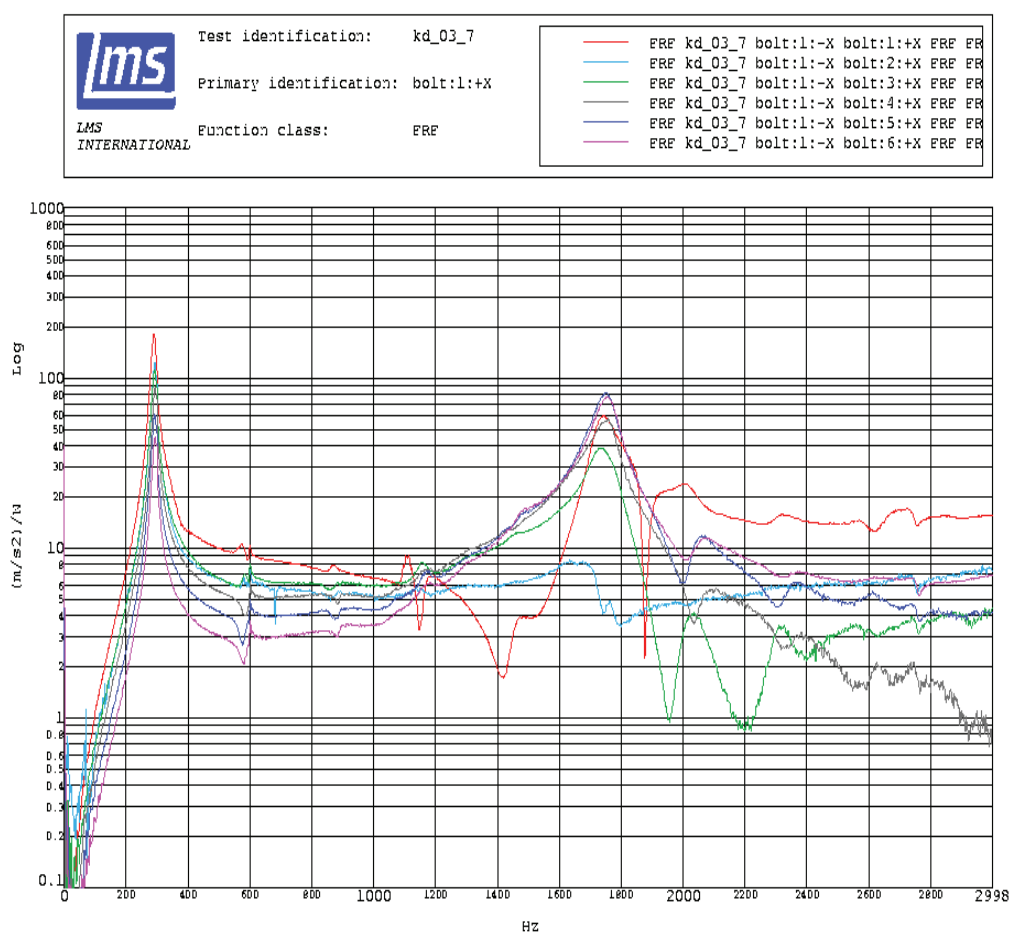
$$\phi_{jr} = \frac{rA_{jk}}{\phi_{jr}} \quad (3)$$

gdzie: ϕ_{jr} , ϕ_{jr} – współrzędne wektora po jego znormalizowaniu.

Stąd dla pełnego obrazu drgań badanej struktury o n stopniach swobody jest potrzebny pomiar funkcji przejścia w n różnych punktach badanej struktury, włączając w to funkcję przejścia mierzoną w punkcie wymuszenia (Uhl 1997; Maia, Silva 1997). Jest to równoważne z pomiarami funkcji przejścia będących elementami kolumny lub wiersza macierzy $[H]$. W praktyce często jest zasadne zwiększenie liczby punktów pomiarowych i pomiar dodatkowych elementów macierzy, na przykład dodatkowego wiersza (lub kolumny).

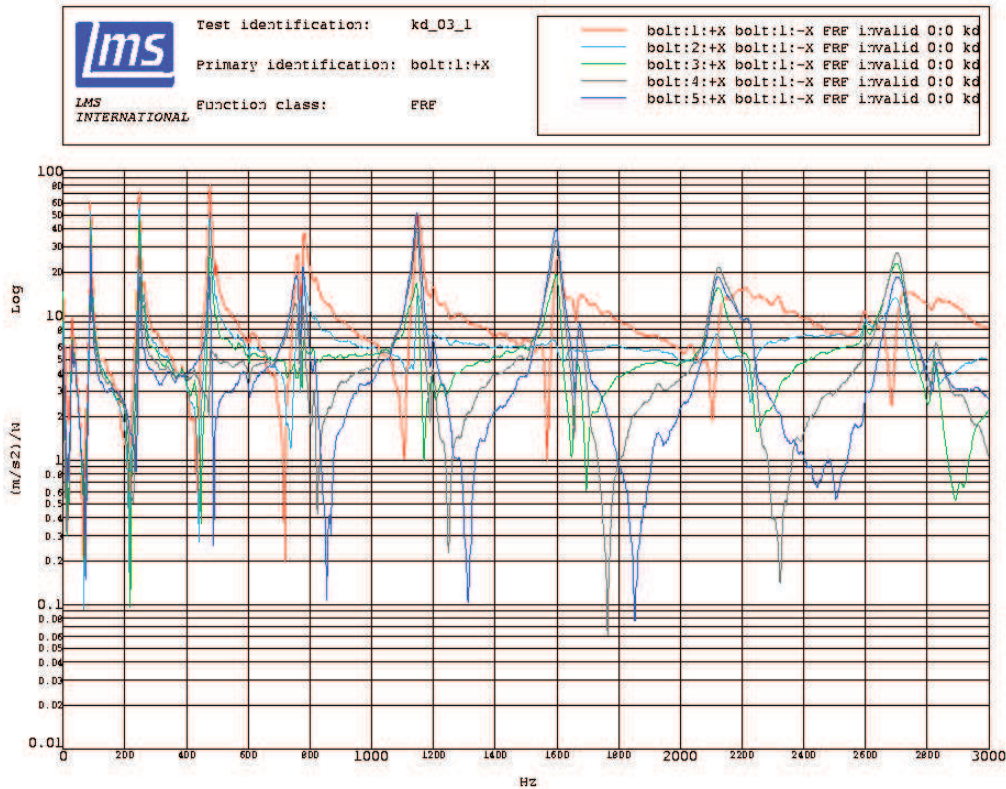
W prowadzonych badaniach zasadniczym parametrem modalnym, który był brany pod uwagę w celu rozróżnienia poszczególnych przypadków nieciągłości wkleje-

nia, była częstotliwość drgań własnych. Postaci drgań własnych z oczywistych względów nie mogą być określone dla całej drgającej struktury (brak dostępu do części znajdującej się w górotworze). Było to możliwe jedynie w warunkach laboratoryjnych. W celu zwiększenia dokładności metody, pomiary funkcji przejścia były wykonywane dla 5–7 punktów rozmieszczonych na wystającym z górotworu odcinku żerdzi. Zapewniało to obliczanie częstotliwości drgań własnych z wykorzystaniem większej liczby równań oraz uśrednienie otrzymanych wyników metodą najmniejszych kwadratów. Dodatkowo można było w ten sposób uniknąć przypadkowego wymuszenia drgań w węzle określonej postaci drgań. Poniżej na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przykłady wyników badań dla wklejenia realizowanego w sposób kontrolowany w warunkach rzeczywistych stosowania samodzielnej obudowy kotwiowej.



Rys. 5. Charakterystyki FRF dla poszczególnych punktów wymuszenia dla przypadku wklejenia na długości $\frac{1}{2}$ długości żerdzi – od calizny stropu

Fig. 5. FRF characteristics for different points of excitation for a rockbolt grouted at $\frac{1}{2}$ of its length, starting from the outer end



Rys. 6. Charakterystyki FRF dla poszczególnych punktów wymuszenia dla przypadku wklejenia na długości $\frac{1}{2}$ długości żerdzi – od dna otworu

Fig. 6. FRF characteristics for different points of excitation for a rock bolt grouted at $\frac{1}{2}$ of its length, starting from the hidden end

Zasadniczy element identyfikacji nieciągłości wklejenia, to porównanie wyznaczonych eksperymentalnie częstotliwości drgań własnych z bazą danych otrzymaną w wyniku teoretycznej analizy modalnej realizowanej na modelu elementów skończonych badanego obiektu dla różnych warunków brzegowych odpowiadających różnym przypadkom nieciągłości wklejenia. Model teoretyczny, aby mógł być stosowany jako baza odniesienia, musiał być dostrojony na podstawie wyników eksperymentu dla przypadków wklejenia prowadzonych w sposób kontrolowany.

5. WYKONANIE OBLICZEŃ I WERYFIKACJA WARUNKÓW BRZEGOWYCH

Proces dostrojenia modeli eksperymentalnego i teoretycznego realizowano dla przypadków, które były analizowane w rzeczywistych warunkach stosowania obudowy kotwicznej w wyrobiskach górniczych (dla przypadków, w których wklejenie prowadzone było w sposób kontrolowany). Wykonanie obliczeń, które miało na celu określenie wrażliwości odpowiedzi w poszczególnych punktach modelu (stopniach

swobody) na zmiany wartości zbioru parametrów modelu (opisujących właściwości mechaniczne badanego obiektu czyli: parametry materiałowe, przyjęty rodzaj tłumienia itp.), nie dało pozytywnych rezultatów. Brak możliwości dopasowania modeli eksperymentalnego i analitycznego przez zmiany parametrów modelu skłonił autora do nieznacznych modyfikacji przyjętych warunków brzegowych w modelu teoretycznym (długości odcinków, na których żerdź była wklejona), a które w praktyce mogły częściowo różnić się od założonych. Po szeregu, przeprowadzonych w sposób iteracyjny, zmianach geometrii warunków brzegowych oraz towarzyszących im obliczeniach parametrów modalnych i funkcji przejścia, osiągnięto zadawalającą zgodność dopasowania modeli. Stwierdzono, że ten sposób dopasowania jest efektywny dla całej grupy przypadków, uwzględniając zidentyfikowane dla danego przypadku częstości własne. Uzasadniony był również wniosek, że parametry opisujące właściwości mechaniczne modelu elementów skończonych zostały właściwie określone już na etapie jego projektowania (parametry były wyznaczone empirycznie) i stąd wcześniejszy brak skuteczności dopasowania modelu przez ich modyfikację.

5.1. Dopasowanie modeli modalnych eksperymentalnego oraz teoretycznego

Jednym z podstawowych zadań teoretycznej analizy modalnej jest dostrajanie modeli obliczeniowych (np. modeli elementów skończonych), które stanowią analityczny obraz rzeczywistych badanych obiektów do modelu eksperymentalnego. Modele dostraja się na podstawie wyników eksperymentalnej analizy modalnej. Wszelkie modyfikacje rzeczywistego obiektu mogą być wtedy opisane wprowadzonymi zmianami w modelu analitycznym (Bochniak, Uhl, Lisowski 1999).

Wyniki eksperymentalnej analizy modalnej w postaci charakterystyk funkcji przejścia są mierzone i rejestrowane podczas pomiaru. W przypadku porównywania modeli analitycznego i eksperymentalnego najbardziej dogodnie jest porównanie parametrów modalnych tych modeli. Wynika to z faktu, że obliczenie przebiegu funkcji przejścia dla modeli analitycznych wymaga wcześniejszej znajomości parametrów modalnych, a jej postać zależy od liczby modów drgań, które uwzględnione zostały w obliczeniach. Parametry modalne natomiast, mogą być określane oddzielnie dla poszczególnych modów drgań w przyjętym zakresie częstotliwości, ograniczonym do zakresu użytecznego w przypadku konkretnego testu. Równocześnie eksperymentalna identyfikacja parametrów modalnych wymaga także wykonania koniecznych procedur obliczeniowych. Warunkiem jest posiadanie określonych mocy obliczeniowych i czasu. Pomimo tego wymagania, porównanie parametrów modalnych modelu eksperymentalnego i analitycznego jest jedną z najczęściej stosowanych metod dopasowania modeli.

W celu weryfikacji dopasowania modeli teoretycznego i eksperymentalnego najbardziej oczywistą czynnością jest porównanie zmierzonych częstotliwości własnych względem wartości obliczonych numerycznie (na podstawie modelu elementów skończonych). Można takie porównanie zrealizować tabelarycznie oraz w formie wykresu. Wykres jest bardziej użyteczny, gdyż pozwala na określenie stopnia korelacji tych modeli oraz przedziału występujących rozbieżności. Ważne jest jednak, aby zestawiane dane pochodziły od odpowiadających sobie postaci (modów) drgań,

niekoniecznie kolejnych. Jeżeli modele są dobrze skorelowane ze sobą, to punkty wykresu, w którym na osiach są oznaczone odpowiadające sobie częstotliwości drgań własnych, powinny znajdować się na prostej przecinającej oś współrzędnych pod kątem około 45° . Duże rozproszenie punktów świadczy o poważnych błędach modelowania numerycznego lub błędach popełnionych w czasie pomiarów. Jeżeli odchylenie punktów ma charakter systematyczny, świadczy to o występowaniu nieliniowości w badanej strukturze.

5.2. Metody porównywania modeli teoretycznego i eksperymentalnego, wyznaczanie korelacji funkcji przejścia

W przypadku dostrojenia modeli eksperymentalnego i analitycznego przez porównanie i wyznaczenie korelacji charakterystyk odpowiedzi badanego układu na wymuszenie, może być to realizowane zarówno w dziedzinie czasu – odpowiedź impulsowa układu (IRF), jak i w dziedzinie częstotliwości – funkcja przejścia (FRF). W najprostszej formie stopień zgodności jest określany przez nałożenie pojedynczych charakterystyk otrzymanych dla obu dopasowywanych modeli. Warunkiem wykreślenia teoretycznych charakterystyk funkcji przejścia jest przyjęcie prawidłowych założeń dotyczących: rodzaju i stopnia tłumienia (co nie jest bezpośrednio częścią modelowania) i liczby wektorów modalnych, które będą uwzględnione w obliczeniach (Silva, Maia 1999).

Podczas typowego testu modalnego, w przypadku impulsowego wzbudzenia drgań, wymuszenie drgań jest wykonywane w wielu punktach badanego obiektu (dla testów z wzbudnikiem drgań jest zmieniane położenie przetwornika odbiorczego). W celu otrzymania stopnia korelacji i dopasowania modeli analitycznego i eksperymentalnego dla wymuszenia w punkcie j i odpowiedzi w punkcie k , można zdefiniować parametr $FRAC(j)_k$ (*Frequency Response Assurance Criterion*) określony zależnością

$$FRAC(j)_k = \frac{\sum_{i=1}^L |X H_{jk}(\omega_i) - A H_{jk}^*(\omega_i)|^2}{\sum_{i=1}^L |X H_{jk}(\omega_i)|^2 \sum_{i=1}^L |A H_{jk}(\omega_i)|^2} \quad (4)$$

gdzie:

- $X H_{jk}$ – funkcja przejścia dla modelu eksperymentalnego,
- $A H_{jk}$ – funkcja przejścia dla modelu analitycznego,
- $i = 1, L$ – zakres częstotliwości, w którym dokonuje się obliczenia,
- j – punkt wymuszenia,
- k – punkt odpowiedzi.

5.3. Metoda dostrajania modeli w dziedzinie częstotliwości

Metody dostrajania modeli elementów skończonych na podstawie danych uzyskanych w badaniach można podzielić na:

- metody bezpośrednie dostrajania, w których poszczególne elementy macierzy mas i sztywności są dostrajane na podstawie wyników obliczeń i badań,
- metody pośrednie polegające na dopasowaniu właściwości fizycznych modelu.

Druga grupa metod dostrajania wydaje się być bardziej odpowiednia, ponieważ działania są wykonywane wprost na wielkościach fizycznie występujących w danej strukturze.

Rozpatrując odpowiedź układu w dziedzinie częstotliwości i zakładając, że po pewnych modyfikacjach dostrojony model elementów skończonych poprawnie przedstawia zmierzone funkcje przejścia, równanie opisujące odpowiedź układu po i przed modyfikacją można przedstawić w postaci (Ewins 2000; Silva, Maia 1999)

$$\mathbf{Z}_U(\omega) \mathbf{H}_X(\omega) = \mathbf{f} = \mathbf{Z}_A(\omega) \mathbf{H}_A(\omega) \quad (5)$$

gdzie:

Z – macierz sztywności dynamicznej,

f – przyłożona siła,

X, A, U – symbole oznaczające odpowiednio model eksperymentalny, obliczeniowy i poprawiony obliczeniowy.

Odejmując od obu stron równania wyrażenie: $\mathbf{Z}_A(\omega) \mathbf{H}_X(\omega)$, dla przyłożonej siły jednostkowej równanie (2) może być przekształcone do postaci

$$\Delta \mathbf{Z}(\omega) \mathbf{H}_X(\omega) = \mathbf{f}_j - \mathbf{Z}_A(\omega) \mathbf{H}_X(\omega) \quad (6)$$

gdzie:

$[\Delta Z(\omega)]$ – błąd macierzy sztywności dynamicznej,

j – lokalizacja punktu przyłożenia siły.

Mnożąc obie strony równania przez macierz funkcji przejścia dla modelu analitycznego otrzymuje się

$$\mathbf{H}_A \Delta \mathbf{Z}(\omega) \mathbf{H}_X(\omega) = \mathbf{H}_A(\omega) \mathbf{f}_j - \mathbf{H}_X(\omega) = \Delta \mathbf{H}_A(\omega) \quad (7)$$

Prawa strona równania przedstawia brak dopasowania funkcji przejścia: analitycznej i eksperymentalnej.

Aby otrzymać rozwiązanie, konieczny jest wybór parametrów wpływających na wielkość błędu. Wybiera się N_p parametrów modelu jako zmienne tworzące wektor $\{P\}$, które są przyczyną braku dopasowania modeli analitycznego i eksperymentalnego. Parametry te można przedstawić w postaci bezwymiarowej

$$p_i = \mathbf{e}_i - \gamma_i^0 \sum P_i^0 \quad (8)$$

gdzie $\{P^0\}$ są wartościami parametrów dla modelu analitycznego przed wprowadzeniem zmian. Parametry dopasowania p_i reprezentują częściowe zmiany zmiennych parametrów modelu. Szukana macierz sztywności dynamicznej dla dopasowywanego modelu elementów skończonych $[Z_U]$ jest funkcją $\{p\}$ i może być przedstawiona jako rozwinięcie w szereg Taylora względem macierzy sztywności dynamicznej początkowego modelu, $[Z_A]$, w sposób określony zależnościami

$$\mathbf{Z}_U = \mathbf{Z}_A + \Delta = \mathbf{Z}_A + \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial \mathbf{Z}_A}{\partial p_i} p_i + \gamma_i^2 \right] \quad (9)$$

Pozostawiając jedynie składniki sumy dla pochodnej pierwszego rzędu otrzymuje się

$$\underline{\Delta} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial \underline{F}}{\partial p_i} p_i \quad (10)$$

Podstawiając wyrażenie (10) do równania (7) otrzymuje się po przekształceniach

$$\underline{S}(\omega) \underline{A} = \Delta H(\omega) \quad (11)$$

gdzie

$$\underline{S}(\omega) = \underline{H}_A(\omega) \left[\frac{\partial \underline{F}}{\partial p_1} \underline{H}_X(\omega) + \dots + \frac{\partial \underline{F}}{\partial p_{N_p}} \underline{H}_X(\omega) \right] \quad (12)$$

Każdy wiersz macierzy $[S(\omega)]$ określa wrażliwość odpowiedzi w poszczególnych stopniach swobody (współrzędnych) na zmiany wartości zbioru parametrów p . Równanie (11) przedstawia układ N liniowych równań dla N_p niewiadomych odnoszących się do pojedynczej częstotliwości ω . Na podstawie N_f punktów charakterystyki częstotliwościowej można utworzyć N_f układów równań, co daje $N_f \cdot N$ równań dla N_p niewiadomych. Taki nadmiarowy układ równań może być rozwiązany, na przykład z wykorzystaniem metody dekompozycji wartości osobliwych (SVD), a otrzymany wynik jest rozwiązaniem uśrednionym metodą najmniejszych kwadratów. W przypadku braku wyników dla pewnych stopni swobody (brak wymuszenia dla tych stopni) wiersze równania (11) mogą być rozdzielone i można rozpatrywać brak dopasowania modeli tylko dla punktów wymuszenia. Jeżeli jednak nie zamierza się zredukować liczby stopni swobody w modelu elementów skończonych, macierz wrażliwości po lewej stronie równania (8) wymaga określenia odpowiedzi dla wszystkich stopni.

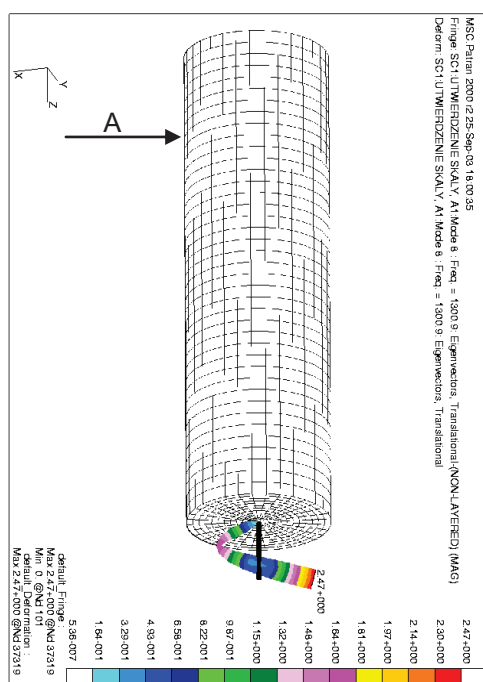
5.4. Utworzenie i analiza modeli elementów skończonych dla badanych przypadków nieciągłości wklejenia

Długość odcinków, na których żerdź (stalowy pręt) jest wklejona w górotworze określa warunki brzegowe. Różne przypadki nieciągłości wklejenia mogą być wtedy opisane przez zmianę warunków brzegowych w modelu analitycznym. Następnie po dostrojeniu, model elementów skończonych może stanowić odniesienie dla wyników badań eksperymentalnych nieznanymi przypadkami.

W badaniach własnych do budowy modeli elementów skończonych zastosowano oprogramowanie MSC/Patran. Program ten umożliwia tworzenie modeli elementów skończonych na podstawie zaawansowanych narzędzi programistycznych, służących do odwzorowania dowolnej geometrii obiektu. Budowę modelu rozpoczęto od wprowadzenia jego geometrii. Następnie model geometryczny podzielono na elementy dyskretne i przypisano im określone właściwości fizyczne takie, jak: gęstość materiału, moduł Younga, liczba Poissona, na podstawie których są tworzone macierze mas i sztywności. Podział modelu na grupy elementów skończonych daje możliwość przypisania określonych właściwości fizycznych do określonej grupy.

Może to być wykorzystane w kolejnym etapie, którym jest dostrajanie modeli: teoretycznego i eksperymentalnego. Do obliczeń dynamicznych modeli elementów skończonych zastosowano program MSC/Nastran.

Na rysunku 7 przedstawiono geometrię modelu elementów skończonych dla żerdzi kotwicznej wklejonej w górotwór. Górotwór został zamodelowany w postaci walca. W celu przybliżenia warunków rzeczywistych, węzły leżące na powierzchni walca zostały w modelu unieruchomione (położenie jednego z unieruchomionych węzłów zaznaczono literą A). Warstwę spoiwa na odcinkach, na których żerdź była mechanicznie związana z górotworem, zamodelowano w postaci wydrążonego walca o średnicy wewnętrznej równej średnicy żerdzi i średnicy zewnętrznej równej średnicy otworu w górotworze.

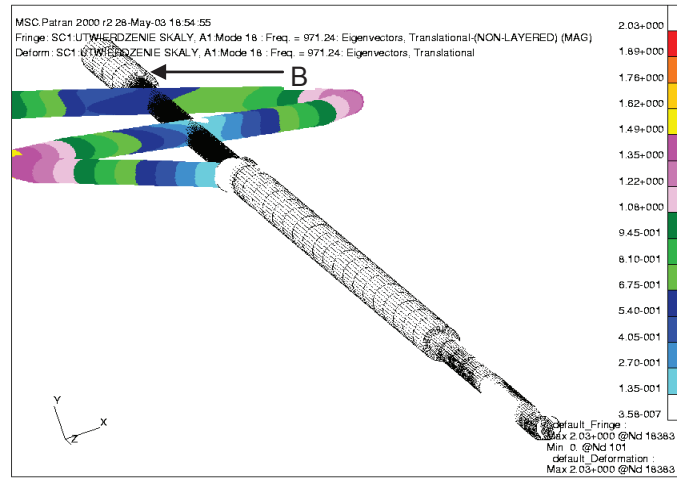


Rys. 7. Geometria modelu elementów skończonych dla żerdzi kotwicznej wklejonej w górotwór, model utworzony w programie Patran

Fig. 7. Geometry of a finite element model for a rockbolt grouted into the rock, a Patran model

Na rysunku 8 przedstawiono przykład modelowanej nieciągłości wklejenia. Widoczna jest warstwa spoiwa przylegająca do żerdzi (warstwa skały została graficznie zdjęta).

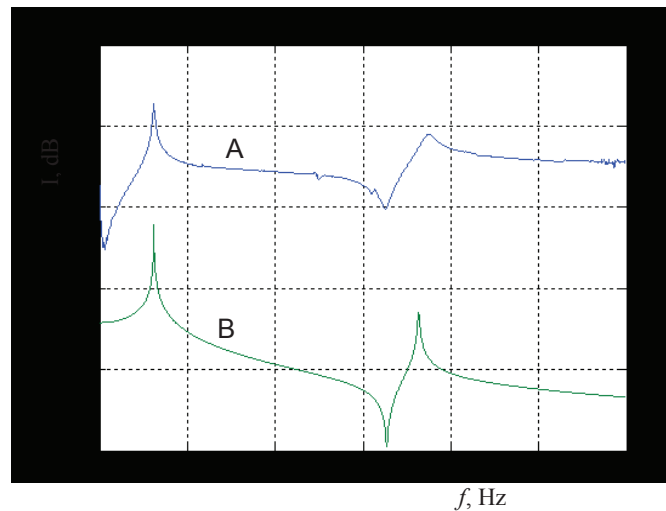
Modele elementów skończonych zostały utworzone dla różnych przypadków nieciągłości wklejenia, które praktycznie można było zrealizować w rzeczywistych warunkach stosowania obudowy. Po utworzeniu modeli analitycznych (MES) realizowano teoretyczną analizę modalną. W wyniku tej analizy, która obejmowała obliczenia częstotliwości drgań własnych oraz funkcji przejścia (dla wymuszenia w punkcie znajdującym się na wystającym z górotworu odcinku żerdzi), otrzymano dla każdego analizowanego przypadku zbiór częstotliwości drgań własnych charakterystycznych dla zamodelowanego rodzaju nieciągłości.



Rys. 8. Przykład nieciągłości wklejenia. Postać drgań charakterystyczna dla końcowego odcinka żerdzi jest również widoczna na odcinku wystającym z górotworu, co umożliwia pomiar. Koniec żerdzi nie jest mechanicznie związany ze skałą, której fragment jest widoczny na dalszym planie (oznaczony literą B)

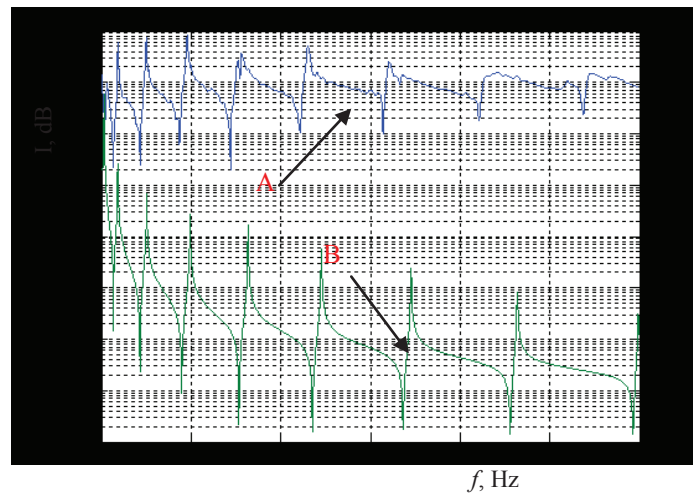
Fig. 8. An example of grouting. Mod which is characteristic of a hidden part of a rock bolt transfers to its outer part, what enables measurement. There is no resin layer between the end of the rock bolt and adjacent rock (indicated with letter B)

Na rysunkach 9 i 10 pokazano przykłady wyników procedury dopasowania modeli. Wyniki zastosowania kryterium FRAC dla rozpatrywanych przypadków oraz zestawienie częstotliwości drgań własnych, zidentyfikowanych dla obiektu rzeczywistego i analitycznego (MES), zamieszczono w tablicach 1 i 2.



Rys. 9. Wklejenie na połowie długości żerdzi, zaczynając od calizny stropu. Porównanie funkcji przejścia zmierzonej i obliczonej z wykorzystaniem MES: f – częstotliwość, I – inertancja

Fig. 9. A rock bolt grouted at $\frac{1}{2}$ of its length, starting from the outer end. Comparison of FRF characteristics measured (experiment) and calculated (FE Model): f – frequency, I – inrtance



Rys. 10. Wklejenie na połowie długości żerdzi, zaczynając od dna otworu. Porównanie funkcji przejścia zmierzonej i obliczonej z wykorzystaniem MES: f – częstotliwość, I – inertancja

Fig. 10. A rock bolt grouted at $\frac{1}{2}$ of its length, starting from the hidden end. Comparison of FRF characteristics measured (experiment) and calculated (FE Model): f – frequency, I – inertance

Tabela 1. Porównanie zidentyfikowanych częstotliwości drgań własnych w przypadku wklejania typu 1100 (w połowie długości żerdzi, zaczynając od calizny stropu)

Częstotliwości wyznaczone, Hz	
teoretyczne	eksperymentalne
98,9	–
277,1	–
307,9	306,9
544,3	585,2
903,2	924,4
1356,7	–
1815,1	1872,5
1909,1	–

Tablica 2. Porównanie zidentyfikowanych częstotliwości drgań własnych w przypadku wklejania typu 0011 (na połowie długości żerdzi zaczynając od dna otworu)

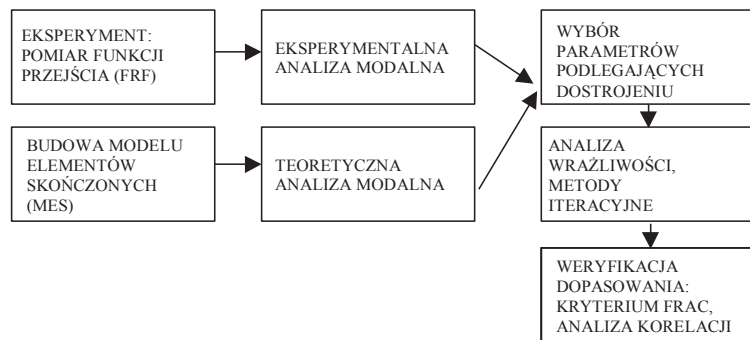
Częstotliwości wyznaczone, Hz	
teoretycznie	eksperymentalnie
89,3	90,5
250,8	247,8
492,8	475,8
816,5	780,9
1225,3	1147,4
1725,6	1596,7
2317,3	2118,5
2992,3	2702,6

Poprawność dopasowania jest określana na podstawie porównania charakterystyk funkcji przejścia oraz wartości częstotliwości drgań własnych. W przypadku przedstawionym na rysunkach 5 i 9 są to częstotliwości odpowiednio 306,9 Hz i 1872,5 Hz, charakte-

rystyczne dla drgań odcinka przed wklejeniem oraz 585,2 Hz i 924,4 Hz (oznaczone w tabelicy 1 czcionką pogrubioną), charakterystyczne dla drgań odcinka za wklejeniem.

Na rysunku 10 jest widoczne przesunięcie częstotliwości drgań własnych w górnym zakresie analizowanego pasma (odpowiadające sobie częstotliwości oznaczono literami A i B). Jednakże analiza współczynników korelacji dla poszczególnych przypadków wykazała dobre dopasowanie modeli eksperymentalnego i analitycznego. Oznacza to, że przesunięcie częstotliwości ma charakter systematyczny i nie ma znaczącego wpływu na jakość dopasowania. Niemniej, świadczy to o istnieniu charakterystyki częstotliwościowej (np. nieliniowości) powodującej to odchylenie.

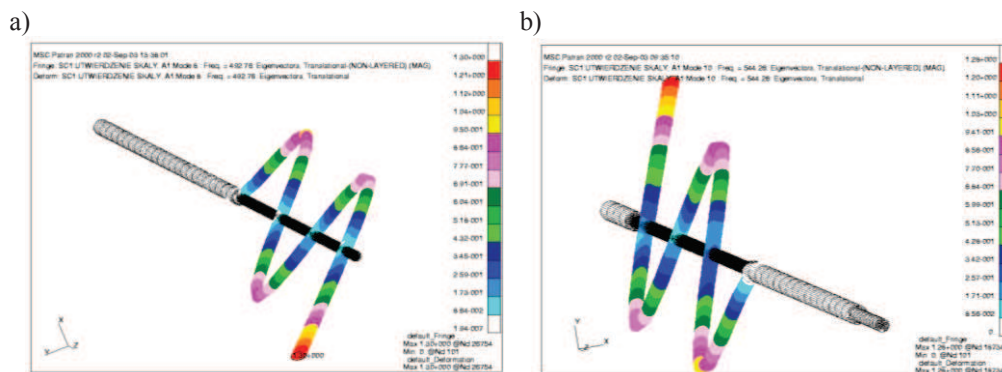
Proces dopasowania modeli eksperymentalnego i teoretycznego przedstawiono na schemacie blokowym (rys. 11).



Rys. 11. Proces dopasowania i walidacji modeli eksperymentalnego i teoretycznego

Fig. 11. Process of adjustment and validation of experimental and theoretical modal models

Na rysunku 12 przedstawiono przykłady postaci drgań obliczonych z wykorzystaniem modelu MES dla przypadków wklejenia na odcinku $\frac{1}{2}$ długości żerdzi, analizowanych na rysunkach 5 i 6.



Rys. 12. Przykłady postaci drgań wyznaczonych teoretycznie dla dwóch przypadków wklejenia na odcinku $\frac{1}{2}$ długości żerdzi zaczynając od: a – calizny stropu, b – od dna otworu

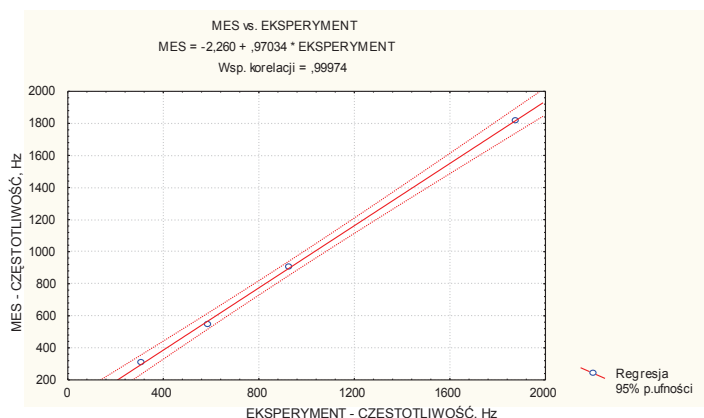
Fig. 12. Examples of mode shapes for two cases of grouting, at $\frac{1}{2}$ of the rock bolt length, starting from: a – an outer, b – a hidden end

Przedstawione w tablicach 1 i 2 częstotliwości drgań żerdzi kotwiowej identyfikują nieciągłość wklejenia. Podkreślić należy, że poszczególne zbiory częstotliwości są charakterystyczne dla poszczególnych przypadków nieciągłości wklejenia.

Potwierdzenie skuteczności dostrojenia poszczególnych analizowanych przypadków przeprowadzono na podstawie analizy współczynników korelacji między modelami analitycznym i eksperymentalnym oraz charakterystyk regresji liniowej.

5.5. Opracowanie statystyczne wyników badań, obliczenia współczynników korelacji oraz regresji liniowej

Jako wynik dopasowania modeli: analitycznego i eksperymentalnego obliczono współczynniki korelacji oraz charakterystyki regresji liniowej (dla poziomu ufności 95%) dla wyznaczonych eksperymentalnie oraz obliczonych na podstawie modelu elementów skończonych częstotliwości drgań własnych (Brandt 1974). Opracowanie statystyczne wyników było podsumowaniem badań. Przykład prowadzonych obliczeń przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Współczynnik korelacji oraz wykres regresji liniowej dla wklejenia w połowie długości, zaczynając od calizny stropu

Fig. 13. Correlation coefficient and regression curve for particular case. Vertical axe – FE Model and theoretical modal analysis, horizontal axe – experimental modal analysis

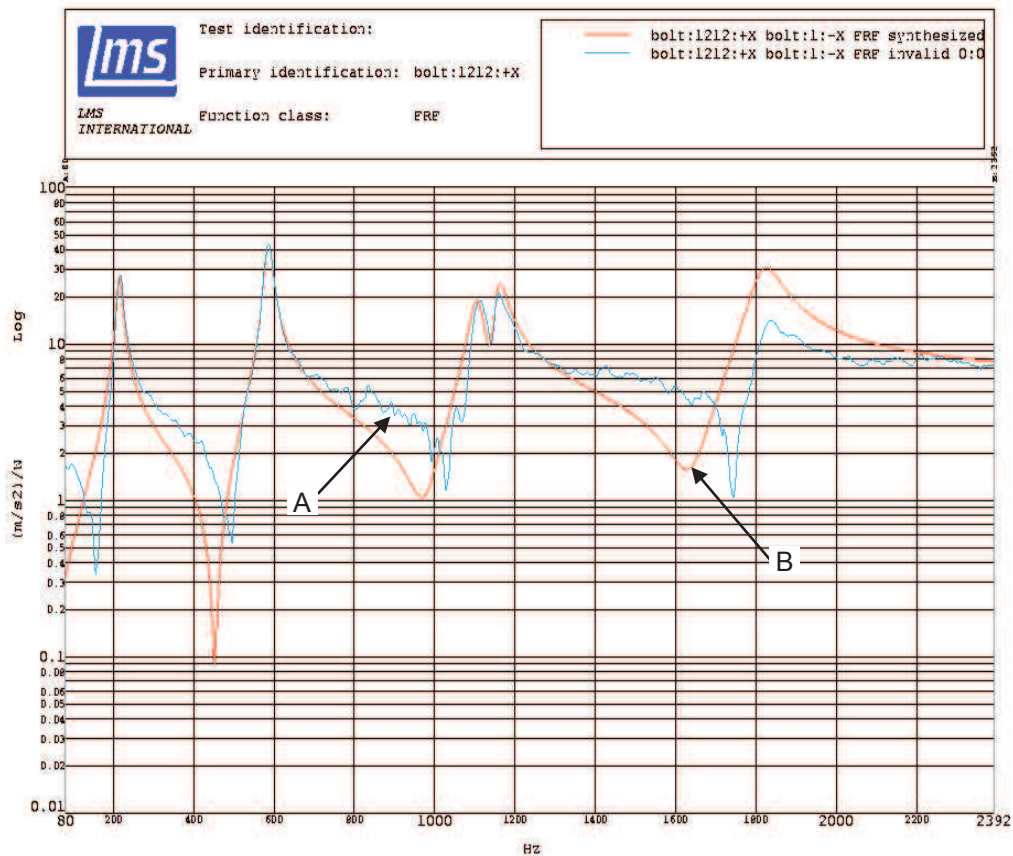
W tablicy 3 zestawiono częstotliwości drgań własnych dla trzech przypadków o takim samym typie wklejenia (jak w przypadku analizowanym na rys. 9) oraz dla porównania wyniki obliczeń z wykorzystaniem modelu elementów skończonych (model MES).

Tablica 3. Zestawienie częstotliwości drgań własnych dla trzech przypadków o takim samym typie wklejenia

Częstotliwości drgań własnych, Hz			
eksperyment			MES
291,9	306,9	311,4	307,9
599,2	585,2	626,6	544,3
886,3	924,4	937,6	903,2
1867,4	1872,5	1863,6	1815,1

5.6. Przesłanki do identyfikacji nieciągłości wklejenia dla nieznanego przypadku

Badania prowadzone na wklejanych, w sposób kontrolowany, żerdziach kotwionych w wyrobiskach chodnikowych dostarczyły cennych informacji dotyczących możliwości identyfikacji nieciągłości wklejenia oraz wpływu określonych rodzajów nieciągłości na zmiany ich parametrów modalnych. Po dostrojeniu modeli teoretycznego i eksperymentalnego, dla różnych przypadków nieciągłości wklejenia wykonano badania na żerdziach, stanowiących element samodzielnej obudowy kotwionej w typowym wyrobisku chodnikowym. Wyniki analizy dla wybranego przypadku przedstawiono na rysunku 14 oraz w tablicy 4. Do identyfikacji nieciągłości wklejenia, wyznaczone eksperymentalnie częstotliwości drgań własnych posłużyły jako dane wejściowe do procesu wyszukiwania przypadku teoretycznego o określonych warunkach brzegowych (długości wklejenia), wykorzystując wcześniej utworzoną bazę danych.



Rys. 14. Charakterystyki funkcji przejścia otrzymane dla pomiarów w warunkach ruchowych (nieznana nieciągłość wklejenia), A – charakterystyka zmierzona, B – charakterystyka obliczona na podstawie zidentyfikowanych parametrów modalnych

Fig. 14. FRF characteristics for an unknown case of grouting measured in real mine conditions: A – measured FRF, B – synthesized FRF

Tabela 4. Zidentyfikowane częstotliwości drgań własnych dla nieznanego przypadku

Częstotliwości wyznaczone, Hz	
teoretycznie	eksperymentalnie
197,1	214,6
552,8	585,7
1082,8	1106,9
–	1159,2
1800,4	1817,7

Obserwowane na rysunku 14 rozdwojenie częstotliwości 1106,9 Hz i 1159,2 Hz wytłumaczyć można niepełną symetrią drgań poprzecznych w osiach x i y (przy przyjęciu osi z jako osi symetrii żerdzi kotwiowej).

Częstotliwościom drgań własnych, wyznaczonym eksperymentalnie, odpowiadają częstotliwości modelu analitycznego o wklejeniu na długości 180 cm, licząc od dna otworu (brak wklejenia 70 cm dla żerdzi o długości 2,5 m).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Duże zainteresowanie stosowaniem obudowy kotwiowej w przemyśle górniczym wynika z jej parametrów ekonomicznych. Zabezpieczanie wyrobiska taką obudową wymaga krótszego czasu, zużycia mniejszej ilości materiałów, a także jest technicznie dogodniejsze od innych sposobów zabezpieczenia wyrobisk. W górotworze charakteryzującym się mocnym stropem, obudowa kotwiowa jest stosowana powszechnie. W polskim górnictwie węglowym, gdzie stateczność stropu jest mała, obudowa kotwiowa jest stosowana rzadziej, niemniej zainteresowanie jej stosowaniem wyraźnie wzrasta. Równocześnie obserwuje się brak nieniszczących metod badania poprawności zamocowania obudowy kotwiowej (żerdzi kotwiowych). Dotychczas opracowane metody nie dają dostatecznie pewnych wyników. Dlatego też podjęto pracę nad nieniszczącą metodą badania stopnia wklejenia żerdzi kotwiowych z wykorzystaniem nowoczesnych algorytmów przetwarzania sygnałów drganiowych.

W opracowanej metodzie wykorzystano: impulsowe wymuszenie drgań, analizy modalnej, tworzenie modeli teoretycznych badanych struktur mechanicznych wraz z ich weryfikacją eksperymentalną dla najczęściej spotykanych przypadków nieciągłości wklejenia żerdzi.

W badaniach laboratoryjnych wykazano związek przyczynowo-skutkowy między pobudzeniem kotwi do drgań poprzecznych, a odpowiedzią charakteryzującą badaną strukturę. Ze względu jednak na duże różnice w sposobie połączenia elementów układu: kotew–spoiwo–górotwór od warunków rzeczywistych, wyniki badań laboratoryjnych nie mogły stanowić bazy odniesienia. W tym celu podjęto prace nad modelem teoretycznym. Do opracowania takiego modelu zastosowano oprogramowanie Patran/Nastran, uwzględniając rzeczywistą geometrię badanych struktur mechanicznych, sposób ich połączenia oraz parametry materiałowe (wyznaczone również empirycznie).

Prawidłowość tego wyboru została potwierdzona wynikami analiz korelacyjnych modelu teoretycznego i przypadków kontrolowanego wklejenia żerdzi kotwiowych do górotworu (w KD Barbara GIG).

Do realizacji części eksperymentalnej opracowano zestaw aparaturowy oraz program, napisany w środowisku LabVIEW, umożliwiające rejestrację i akwizycję funkcji przejścia (ang. FRF) w warunkach ruchowych. Równocześnie do analizy modalnej CADA-X zastosowano fabryczne oprogramowanie.

Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Parametry dynamiczne badanej struktury (żerdzi kotwiowej) są determinowane przez warunki brzegowe, które stanowią odcinki wklejenia żerdzi do górotworu.
2. Warunkiem koniecznym identyfikacji odcinków nieciągłości jest istnienie teoretycznego modelu badanej struktury uwzględniającego różne przypadki nieciągłości wklejenia (dla badań nieniszczących).
3. Wyniki analizy modalnej zrealizowanej na modelu teoretycznym, dostrojone do modelu eksperymentalnego, stanowią wzorzec odniesienia dla identyfikowanych nieznanymi przypadków.
4. Wzorzec odniesienia może być stosowany dla różnych typów skał stropowych występujących w wyrobiskach korytarzowych.
5. Do określenia parametrów dynamicznych (modalnych) badanych obiektów bardziej odpowiednie jest wymuszanie drgań poprzecznych.
6. Masa przetwornika odbiorczego znacząco wpływa na parametry dynamiczne badanych obiektów, stąd jest istotna jego minimalizacja.
7. Zestaw pomiarowy (aparatura i oprogramowanie) został zweryfikowany w warunkach kopalnianych dla przypadków o nieznanym stopniu wklejenia kotwi do górotworu. Uzyskane wyniki są zbliżone z wielkościami opisywanymi przez modele wzorcowe, co jest potwierdzeniem praktycznej przydatności aparatury, metody przetwarzania sygnałów, jak i samych modeli wzorcowych.

Literatura

1. Bochniak W., Uhl T., Lisowski W. (1999): *Problemy dostrajania modeli elementów skończonych*. AGH, Kraków.
2. Bishop R.E.D, Gladwell G.M.L. (1963): *An investigation into the theory of resonance testing*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Vol. 225 A1055.
3. Brandt S. (1974): *Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych doświadczalnych*. Warszawa PWN.
4. Brown D.L., Allemang R.J., Zimmerman R., Mergeay M. (1979): *Parameter estimation techniques for modal analysis*. SAE Paper No. 790221.
5. Byron F.W., Fuller R.W. (1975): *Matematyka w fizyce klasycznej i kwantowej*. Warszawa, PWN.
6. Dobson B.J. (1987): *Modal analysis of using dynamic stiffness data*. Mechanical System and Signal Processing Vol. 1 No. 1, s. 29–40.
7. Dossing O. (1988): *Structural Testing, Part I: Mechanical mobility measurements*. Naerum, Bruel & Kjaer.
8. Dossing O. (1988): *Structural Testing, Part II: Modal analysis and Simulation*. Naerum, Bruel & Kjaer.
9. Ewins D.J., Gleeson P.T. (1982): *A method for modal identification of lightly damped structures*. Journal of Sound and Vibration Vol. 84 No. 1, s. 57–79.
10. Ewins, D.J. (2000): *Modal Testing. Theory Practice and Application*. Second Edition. Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England.

11. Ibrahim S.R., Mikulcik E.C. (1981): *A method for the direct identification of vibration parameters from the free response*. The Shock and Vibration Bulletin James G.H. Vol. 52 No. 3, s. 13.
12. Carne T.G., Laufer J.P. (1995): *The Natural Excitation Technique (NexT) for modal parameter extraction from operating structures*. Int. Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis Vol. 10 No. 4, s. 260–277.
13. Juang J.N., Pappa R.S. (1985): *An eigensystem realisation algorithm for modal parameter identification and model reduction*. Journal of Guidance, Control and Dynamics Vol. 8 No. 5, s. 294–303.
14. Kennedy C.C., Pancu C.D.P. (1947): *Use of vectors in vibration measurements and analysis*. Journal of Aeronautical Sciences Vol. 14 No. 11.
15. Leuridan J., Vold H. (1983): *A time domain linear model estimation technique for multiple input modal analysis*. The Winter annual Meeting of the ASME, Boston, s. 51–62.
16. Maia, N.M.M., Silva, J.M.M. (1997): *Theoretical and Experimental Modal Analysis*.
17. Pendered J.W. (1963): *Theoretical investigation into the effects of close natural frequencies in resonance testing*. Journal of Mechanical Engineering Science Vol. 7 No. 4, s. 372–379.
18. Remington P.J. (1997): *Experimental and theoretical studies of vibrating systems*. Encyclopedia of Acoustics, John Wiley & Sons Vol. 2.
19. Silva J.M.M., Maia N.M.M. (1999): *Modal Analysis and Testing*.
20. Uhl T., Lisowski W. (1999): *Eksplatacyjna analiza modalna i jej zastosowania*. Kraków, AGH.
21. Uhl T. (1997): *Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych*. Warszawa, WNT.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Antoni Kidybiński