

Wykorzystanie analizy modalnej w badaniu konstrukcji ceglanych narażanych na działanie środowiska zasolonego

Dr inż. Mariusz Żółtowski, lic. Marcin Jędrzejak, Katedra Inżynierii Zarządzania, Wydział Zarządzania, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

1. Wprowadzenie

Budynki ceglane w zależności od miejsca wzniesienia muszą zachowywać odpowiednie wymogi wytrzymałościowe, które nie będą zagrażać bezpieczeństwu ich użytkownika. Szczególnie trudne jest to dla konstrukcji powstałych i narażanych na stałe niekorzystne działanie środowiska wodnego.

Takie ceglane konstrukcje są poddawane różnym niekorzystnym wpływom warunków atmosferycznych, co może mieć wpływ na osłabienie ich własności nośnych. Może to spowodować fakt wpływu drgań na konstrukcję narażoną na działanie soli w środowisku wodnym. Obciążenia dynamiczne mogą powodować skutki niszczące w budynkach o różnych typach konstrukcji [1, 6, 9, 13, 21].

Uznając potrzebę doskonalenia metod badania jakości murowych konstrukcji budowlanych dla potrzeb oceny ich stanu, jak i oceny współczynników bezpieczeństwa muru w tej pracy podjęto próbę badania destrukcji wybranych konstrukcji budowlanych przy pomocy metody eksperymentalnej analizy modalnej [4, 8, 12, 21].

W tym artykule przedstawiono wyniki badań ceglano-elementu murowego w środowisku suchym (naturalnym) i elementu narażonego na niekorzystny wpływ środowiska zasadowego (słona woda) z zastosowaniem eksperymentalnej analizy modalnej i oprogramowaniem LMS służącym do przeprowadzenia i wizualizacji wyników takich badań.

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.

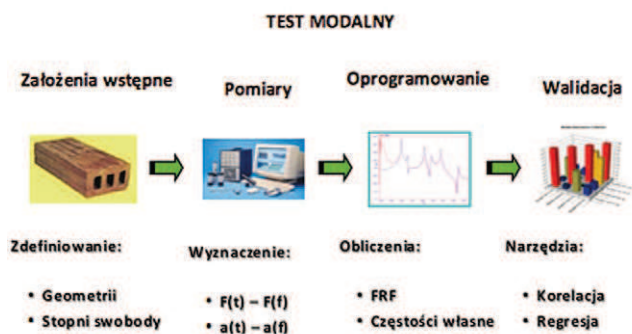
Przedstawione zastosowania analizy modalnej do rozwiązywania zagadnień badawczych i inżynierskich wskazują na uniwersalność i efektywność tej metody, która jak do tej pory nie znalazła szerszego zastosowania w praktyce polskich biur projektowych, czy jednostek badawczych. Na świecie w większości krajów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

2. 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 murowego 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 rysunku 1.

Badany element murowy poddany wymuszeniu siłowemu odpowiada sygnałem drganiowym, proporcjonalnym do stanu destrukcji. Sygnał wymuszenia i odpowiedzi wykorzystuje się dalej do wyznaczenia funkcji FRF i diagramu



Rys. 1. Przebieg procedury realizacji badań w analizie modalnej

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 częstości, a przyspieszenia w zakresie częstości 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 częstości. 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 częstości, 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 częstości 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 (30 kHz), magnesu (7 kHz) lub przykręcić za pomocą śruby (30 kHz).

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 harmonicznych. Algorytm składa się z dwóch kroków: w pierwszym zidentyfikowane zostają bieguny układu, w drugim w 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.

3. Oprogramowanie pomiarowe

Do pomiarów przebiegów czasowych wymuszenia i odpowiedzi układu jak i określenia funkcji FRF wykorzystano najnowocześniejszą aparaturę pomiarową zakupioną na potrzeby projektu firmy LMS pod nazwą LMS TEST. XPRESS. Oprogramowanie to umożliwia w łatwy sposób przeprowadzenie analizy modalnej elementów ceglanych, jak i innych dowolnych konstrukcji budowlanych.

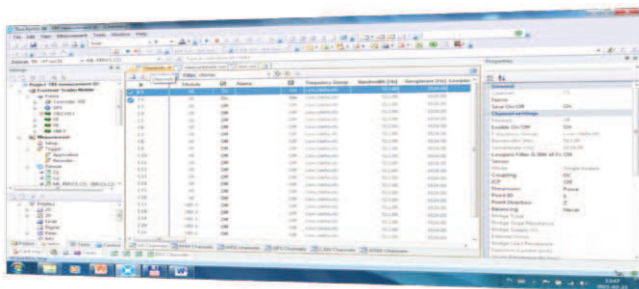
Program posiada łatwy i przyjemny interfejs przyjazny dla użytkownika – rysunek 2.



Rys. 2. Interfejs programu LMS

Kolejnym krokiem jest zdefiniowanie systemu we wszystkie dane potrzebne do kalibracji toru pomiarowego – rysunek 3. Na potrzeby badań przeprowadzonych w tym etapie rozpoczęto od definiowania ilości aktywnych kanałów pomiarowych. Ich liczbę ogranicza tylko liczba wejść na karcie pomiarowej, która jest różna dla różnych modeli segmentów pomiarowych.

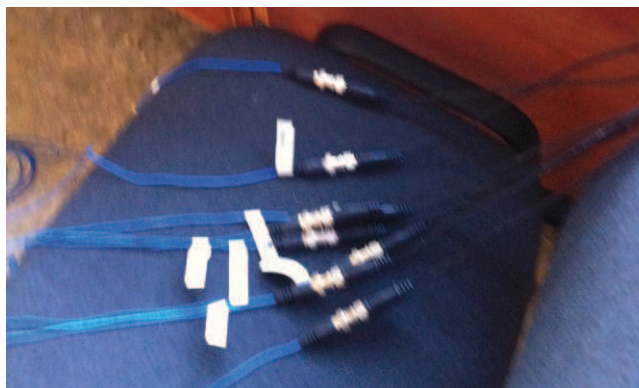
Na potrzeby pomiaru przy użyciu eksperymentalnej analizy modalnej zdefiniowano 2 kanały pomiarowe. Zgodnie z założeniami teoretycznymi eksperymentalnej analizy modalnej pierwszy czujnik zarezerwowano na młotek modalny (wymuszenie drgań), a w miejsce 2 podłączono czujnik piezoelektryczny do pomiaru odpowiedzi elementu na wymuszenie.



Rys. 3. Kalibracja miejsca podłączenia czujników

Na rysunku powyżej pokazano okno kalibracji i zdefiniowane miejsca podłączenia czujników. Właściwości każdego z czujników, który podłączamy do segmentu definiujemy w oknie widocznym po prawej stronie na rysunku. Znajdują się tam wartości charakterystyczne czujników, które w miarę potrzeb można dobierać i zmieniać.

Następnym krokiem było przygotowanie elementów murowych. W ramach badań postanowiono sprawdzić jak zasolenie i przebywanie cegieł w warunkach podwyższonej wilgotności wpływa na ich właściwości mechaniczne.



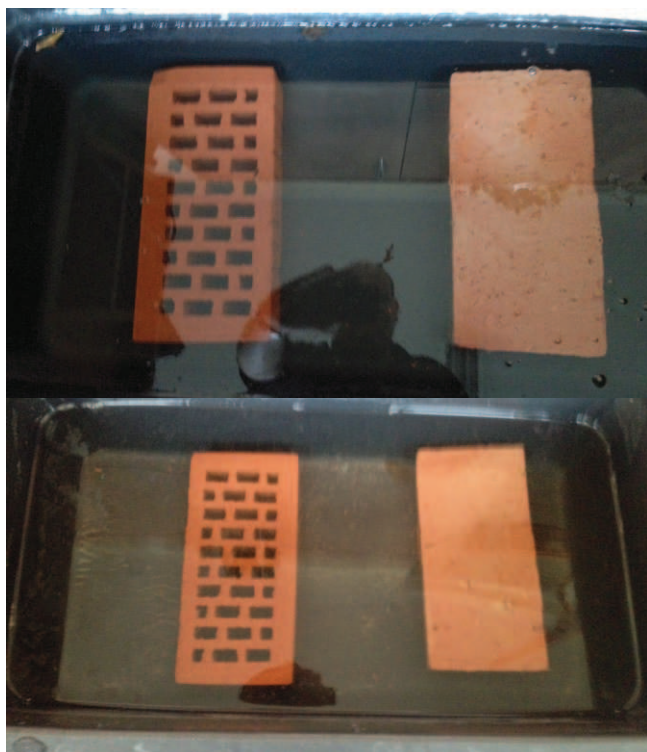
Rys. 4. Podłączanie czujników pomiarowych



Rys. 5. Widok rozstawionej aparatury badawczej

W realizacji tego rodzaju eksperymentu do pomiarów wykorzystano eksperymentalną analizę modalną. W tym celu próbki zanurzone na okres 21 dni odpowiednio w solance i wodzie, co ukazano na rysunku 6. Dla porównania wyniki badań tych próbek porównano z próbkami przechowywanymi w środowisku suchym.

Następnym krokiem było wykonanie pomiarów. Zgodnie z założeniami teorii analizy modalnej próbki zostały podwieszane na nierozciągliwej żyłce, co pozwoliło uwolnić wszystkie więzy. Badania przeprowadzano tylko w osi Z, gdyż z uwagi na to, że były to elementy murewne ceglane, to interesujące są głównie przejścia sygnału drganiowego w kierunku zgodnym z kierunkiem działania sił ściskających na mur. W czasie pomiaru drgania były wymuszane młotkiem modalnym w kierunku $-Z$, natomiast odbiór odbywał się w osi $+Z$ dzięki podklejonomu czujnikowi u dołu elementu – rysunek 7.



Rys. 6. Widok próbek stabilizowanych w solance i wodzie przez okres 21 dni



Rys. 7. Widok montażu badanej próbki w czasie wykonywania pomiarów

4. Wyniki badań

W czasie badań wygenerowano funkcje przejścia sygnału drganiowego przez konstrukcję (funkcja FRF) oraz diagramy stabilizacji wraz z naniesionymi częstotliwościami drgań własnych dla każdego z elementów.

Na rysunkach 7–13 przedstawiono wyniki badań w postaci diagramów stabilizacyjnych, które zostały sporządzone dla średniej z 5 pomiarów (5 wymuszeń i 5 odpowiedzi) dla każdego z badanych elementów murowych.

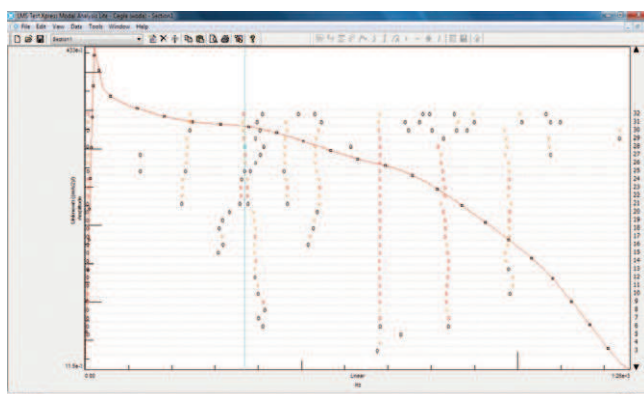
5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań wskazują na fakt, iż istnieje możliwość rozróżniania własności materiałowych, co ma wpływ na możliwość rozróżniania ich własności wytrzymałościowych. Badania również potwierdziły

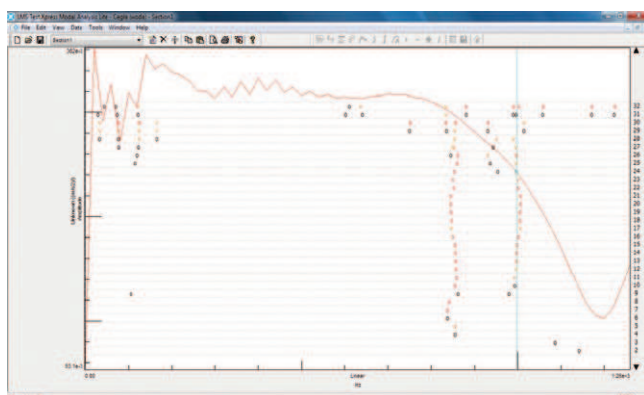
przydatność aparatury LMS do badań z wykorzystaniem eksploatacyjnej analizy modalnej wykonywanych na rzeczywistych konstrukcjach budowlanych.

Z przedstawionych wyników badań można przeprowadzić następujące wnioskowanie wynikowe:

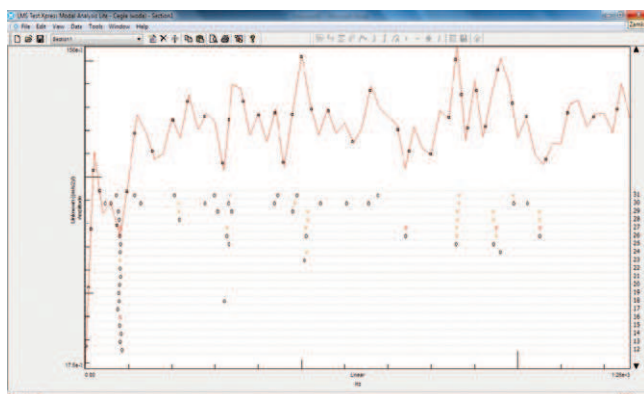
- wygenerowano częstotliwości drgań własnych dla każdego rodzaju badanych elementów murowych z wyjątkiem cegły pełnej w środowisku zasolonym;
- zauważono, iż zmiana warunków przebywania elementów ceglanych z suchego na mokry i zasolony powoduje wzrost wartości częstotliwości drgań własnych dwukrotnie.



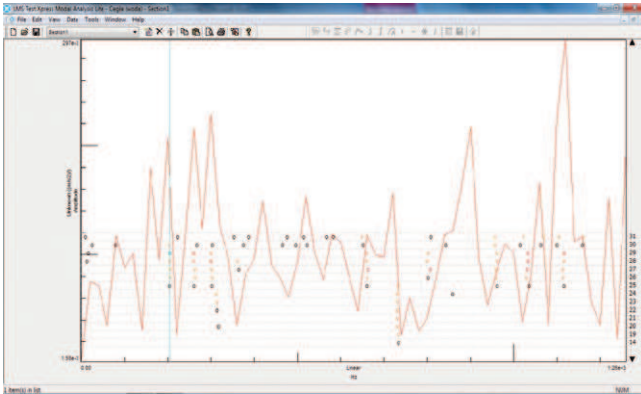
Rys. 8. Diagram stabilizacyjny dla cegły pełnej w środowisku suchym



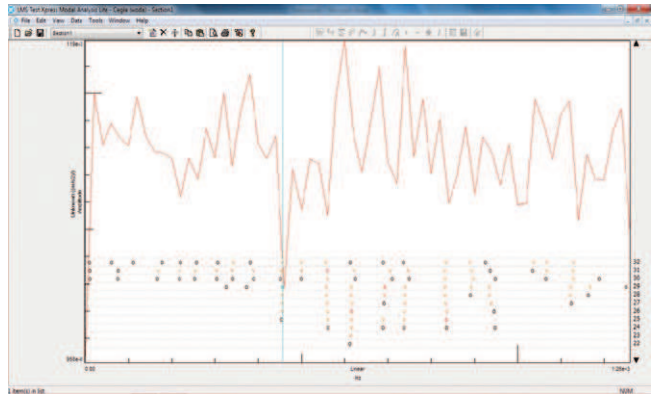
Rys. 9. Diagram stabilizacyjny dla cegły pełnej w środowisku mokrym



Rys. 10. Diagram stabilizacyjny dla cegły pełnej w środowisku zasolonym



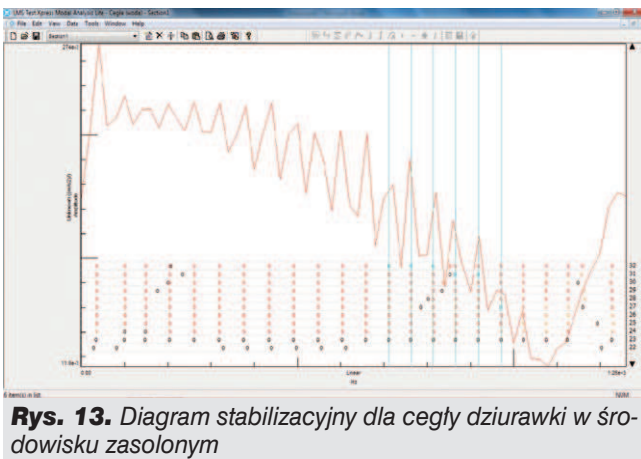
Rys. 11. Diagram stabilizacyjny dla cegły dziurawki w środowisku suchym



Rys. 12. Diagram stabilizacyjny dla cegły dziurawki w środowisku mokrym

Tabela 1. Zestawienie wartości wygenerowanych częstości drgań własnych

| Nazwa materiału | Cegła pełna w stanie suchym | Cegła pełna w stanie mokrym | Cegła pełna w środowisku zasolonym | Cegła dziurawka w stanie suchym | Cegła dziurawka w stanie mokrym | Cegła dziurawka w środowisku zasolonym |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| Wartości częstości drgań własnych | 388,991 Hz | 1059,635 Hz | brak | 254,641 Hz | 480,832 Hz | 700,322 Hz 744,943 Hz 907,756 Hz 968,417 Hz |



Rys. 13. Diagram stabilizacyjny dla cegły dziurawki w środowisku zasolonym

BIBLIOGRAFIA

[1] Batel M., Operational modal analysis – another way of doing modal testing. Sound and Vibration, August 2002
 [2] Bishop R., Johnson D., The mechanics of vibration. Cambridge University, Press, 1980
 [3] Brandt S., Data analysis (in Polish). Wydawnictwo Naukowe PWN (Scientific Publishing House), Warszawa 1999
 [4] Brown D., Allemang R., Multiple Input Experimental Modal Analysis. Fall Technical Meeting, Society of Experimental Stress Analysis, Salt Lake City, UT, November 1983
 [5] Brunarski L., Non-destructive methods for concrete testing (in Polish). Arkady, Warszawa 1996
 [6] Formenti D., Richardson M., Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials (twenty years of progress). Proceedings of International Modal Analysis Conference XX, February 4-7, 2002, Los Angeles, CA
 [7] Ibrahim S., Mikulic E. A., Method for the direct identification of vibration parameters from the free response. Shock and Vibration Bulletin, Vol. 47, Part 4, 1977
 [8] Peeters B., Ventura C., Comparative study of modal analysis techniques for bridge dynamic characteristics. Submitted to Mechanical Systems and Signal Processing, 2001

[9] Pickrel C. R., Airplane ground vibration testing – nominal modal model correlation. Sound and Vibration, November 2002
 [10] Richardson M., Is it a mode shape or an operating deflection shape?. Sound and Vibration, February 1997
 [11] Richardson M., Structural dynamics measurements. Structural Dynamics@2000: Current status and future directions, Research Studies Press, Ltd. Baldock, Hertfordshire, England, December 2000
 [12] Shih C., Tsuei Y., Allemang R., Brown D., Complex mode indication function and its applications to spatial domain parameter estimation. Proceedings of International Modal Analysis Conference VII, January 1989
 [13] Uhl T., Computer-aided identification of mechanical structure models (in Polish). WNT (Scientific Technical Publishers), Warszawa 1997
 [14] Vold H., Schwarz B., Richardson M., Display operating deflection shapes from non-stationary data. Sound and Vibration, June 2000
 [15] Vold H., Kundrat J., Rocklin G. A., Multi-input modal estimation algorithm for mini-computers. S.A.E. paper No. 820194, 1982
 [16] Williams R., Crowley J., Vold H., The multivariate mode indicator function in modal analysis. Proceedings of International Modal Analysis Conference III, January 1985
 [17] Żółtowski M., Computer-aided management of system's operation in production enterprise. Integrated management (in Polish). Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją (Publishing House of Polish Society on Production Management), vol. 2, Opole 2011
 [18] Żółtowski M., Identification of vibration hazards to building objects (in Polish). Budownictwo Ogólne (General Building), ZN ATR, Bydgoszcz 2005
 [19] Żółtowski M., Investigations of harbour brick structures by using operational modal analysis. Polish Maritime Research No 1/2014, pp 32-38
 [20] Żółtowski M., Measurements of acoustic properties of materials (in Polish). Diagnostyka, PTDT, Polska Akademia Nauk (Polish Academy of Sciences), vol.33, 2005
 [21] Żółtowski M., Modal analysis in the testing of building materials ITE-PIB, Radom 2011
 [22] Żółtowski M., Selection of information on identification of the state of machine. UWM, Acta Academia 310, Olsztyn 2007
 [23] Żółtowski M., Żółtowski B., Castaneda L., Study of the state Francis Turbine. Polish Maritime Research No 2/2013, pp 32-38
 [24] Żółtowski M., Technical state identification of wall-elements based on frequency response function. REM-Revista Escola de Minas Applied Mechanics and Materials, Kolumbia 2014