

Dominika ZIAJA¹
Bartosz MILLER²

ANALIZA WPLYWU TEMPERATURY NA ZMIANĘ PARAMETRÓW DYNAMICZNYCH STALOWEJ RAMY PORTALOWEJ

Jedną z nieniszczących metod detekcji uszkodzeń konstrukcji jest obserwacja zmian jej parametrów dynamicznych. Postacie drgań swobodnych i odpowiadające im częstotliwości można otrzymać w wyniku analizy modalnej na podstawie pomiaru przyspieszeń wybranych punktów układu, będących odpowiedzią na znane wymuszenie. Zmiany parametrów dynamicznych zależą nie tylko od stanu konstrukcji, ale również od czynników zewnętrznych towarzyszących pomiarom. W artykule przedstawiono wpływ temperatury na zmiany parametrów dynamicznych układu na przykładzie dwukondygnacyjnej, stalowej ramy portalowej oraz porównano ich wielkość ze zmianami wywołanymi symulowanym uszkodzeniem w postaci luzowania łączników w połączeniach rygiel-słup.

Słowa kluczowe: monitorowanie stanu konstrukcji (SHM), analiza modalna

1. Wprowadzenie

Konieczność zapewnienia bezpieczeństwa na każdym etapie cyklu życia konstrukcji jest przyczyną ciągłego rozwoju dziedziny nazywanej monitorowaniem stanu konstrukcji (ang. Structural Health Monitoring, SHM). Określenie, czy w konstrukcji wystąpiło uszkodzenie, jakich jest ono rozmiarów i jak istotnie wpływa na bezpieczeństwo użytkowanego obiektu pozwala na wczesne podjęcie odpowiednich działań, skutkiem których mogą być znaczące korzyści ekonomiczne (naprawa uszkodzeń małych rozmiarów) lub nawet uniknięcie katastrofy budowlanej.

Wykrywanie uszkodzeń odbywa się poprzez porównanie parametrów układu w danej chwili, określonych przy pomocy metod nieniszczących, ze wzorcem uznawanym za nieuszkodzony. Ważną zaletą metod pomiarowych stosowanych w monitorowaniu jest fakt, że są one nieniszczące, a co za tym idzie nie naruszają

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Dominika Ziaja, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. (0-17)8651618, dziaja@prz.edu.pl

² Bartosz Miller, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. (0-17)8651532, bartosz.miller@prz.edu.pl

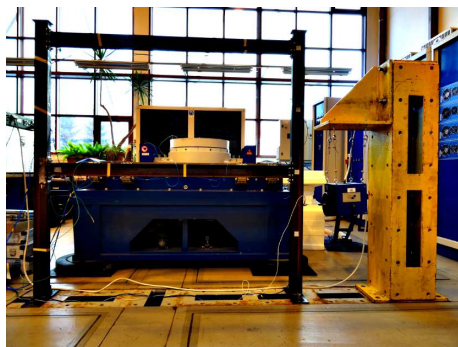
struktury badanego obiektu. Dodatkowo możliwy jest ciągły pomiar w trakcie normalnego użytkowania obiektu (brak konieczności długotrwałego wyłączenia z eksploatacji). Jedną z metod często stosowanych w monitorowaniu jest analiza modalna [1]. W metodzie tej w konstrukcji wzbudza się drgania, mierząc jednocześnie wartość siły wymuszającej, następnie rejestruje się przyspieszenia różnych punktów układu będące odpowiedzią na działanie siły wymuszającej. Na podstawie zgromadzonych danych, otrzymuje się parametry modelu modalnego jakimi są np. częstotliwości i odpowiadające im postacie drgań, charakteryzujące dany stan konstrukcji. Właśnie tę metodę zastosowano w prezentowanych badaniach.

Śledzenie zmian parametrów konstrukcji jest podstawą do oceny jej stanu. Jednak zmiany parametrów dynamicznych, jak podają np. Ko i Ni ([2]), Chatzi i Spiridonakos ([3]), czy Uhl ([4]) mogą być również wynikiem zmiany temperatury układu. Dlatego też, aby uniknąć błędnej interpretacji obserwowanych zmian, konieczne jest określenie wpływu temperatury na częstości i odpowiadające im postacie drgań swobodnych modelu.

Opisywane badania są częścią większego zadania, którego celem jest określenie procedury umożliwiającej skuteczną detekcję uszkodzeń w konstrukcjach stalowych. Ocena, czy wpływ temperatury na zmiany parametrów dynamicznych jest istotny, możliwa jest jedynie w zestawieniu ze zmianami spowodowanymi wystąpieniem uszkodzenia, dlatego w artykule porównano zmiany pochodzące od temperatury ze zmianami będącymi wynikiem symulowanego uszkodzenia.

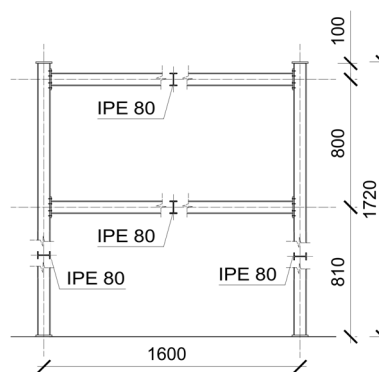
2. Opis modelu

Model laboratoryjny badanej ramy został przedstawiony na rys. 1. Rama w całości wykonana została z dwuteownika IPE 80 (stal S355), a jej wymiary w osiach elementów przedstawiono na rys. 2. Połączenia rygiel-słup oraz połącze-



Rys. 1. Model laboratoryjny ramy

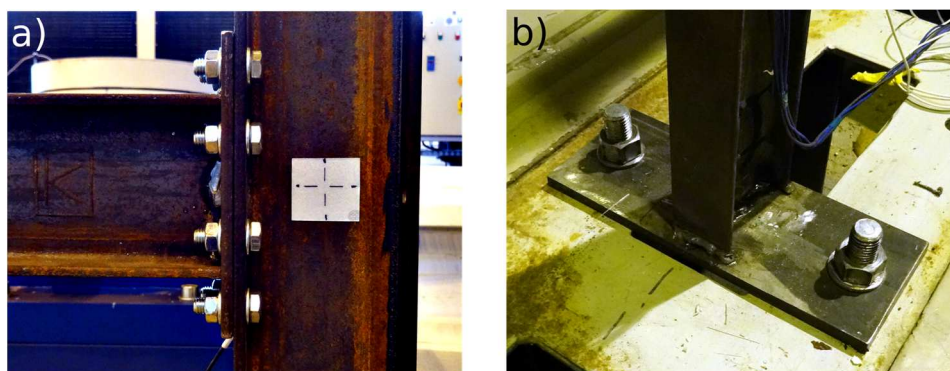
Fig. 1. Laboratory model of the frame



Rys. 2. Schemat modelu, wymiary w mm

Fig. 2. Scheme of the model, dimensions in mm

nie z fundamentem przedstawiono na rys. 3. Kształt połączenia z fundamentem wynikał z konieczności zamocowania ramy do podłogi siłowej w hali Wydziałowego Laboratorium Badań Konstrukcji Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej.



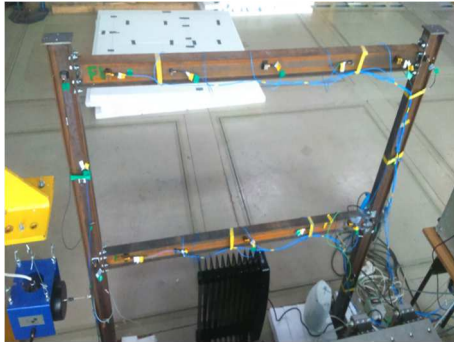
Rys. 3. Połączenia a) rygiel-słup, b) połączenie z fundamentem

Fig. 3. Connections between elements a) beam-to-column connection and b) column footing

3. Aparatura pomiarowa

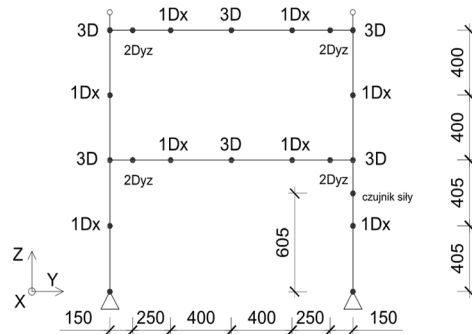
Do pomiarów drgań wykorzystano osiem jednoosiowych czujników przyspieszeń PCB Piezotronics, Inc. model T352C03, pięć trójosiowych czujników przyspieszeń B&K model 4506B003, pięć trójosiowych czujników PCB Piezotronics, Inc. model T356B18, oraz czujnik siły PCB Piezotronics, Inc. model 208C03. Czujniki zostały rozmieszczone na konstrukcji ramy w punktach wyznaczonych na podstawie analizy postaci drgań modelu numerycznego. Ramę z zamocowanymi czujnikami przedstawiono na rys. 4. Pomiary drgań wykonano na kierunkach przedstawionych na rys. 5. Oznaczenia przyjęte na rys. 5: 1D, 2D, 3D - pomiar na 1, 2 lub 3 kierunkach, x, y, z - oznaczenie kierunku pomiarowego według przyjętego układu współrzędnych. Drgania układu wzbudzano wzbudnikiem zamocowanym na dodatkowej konstrukcji wsporczej. Do wykonania pomiarów użyto oprogramowania Siemens LMS Test.Lab 15 z modułem MIMO FRF Testing. Zastosowano sygnał wymuszający w postaci białego szumu. Miejsce przyłożenia wymuszenia na rys. 5. opisano jako „czujnik siły”. Dane zbierano przy pomocy wielokanałowego rejestratora/analizatora LMS Scadas Mobile. Rejestrowany sygnał, po transformacji do dziedziny częstotliwości, miał zakres 0-200 Hz i rozdzielczość 0.097 Hz.

Pomiarom drgań układu towarzyszył pomiar temperatury. Wykorzystano dwa czujniki umieszczone na różnych wysokościach. Jednym z nich była termopara typu K połączona poprzez kondycjoner termopary do analizatora, umożliwiająca rejestrację temperatury dokładnie w czasie trwania pomiaru drgań. Sy-



Rys. 4. Model laboratoryjny ramy z zamontowanymi czujnikami

Fig. 4. Laboratory model of the frame with installed accelerometers



Rys. 5. Schemat rozmieszczenia czujników wraz z kierunkami pomiarowymi, wymiary w mm

Fig. 5. Location of accelerometers and measuring directions, dimensions in mm

gnał z czujnika temperatury każdorazowo był dołączany do danych pomiarowych, co eliminowało ryzyko wystąpienia pomyłki. Drugi czujnik temperatury, połączony z termoregulatorem, naklejony został na powierzchni ramy. Zastosowane czujniki przedstawiono na rys. 6. i rys. 7.



Rys. 6. Termopara połączona z analizatorem SCADAS Mobile

Fig. 6. Thermocouple connected to the analyzer SCADAS Mobile



Rys. 7. Czujnik temperatury

Fig. 7. Temperature sensor

4. Opis procedury badawczej

Zadanie podzielono na dwie części. W pierwszej przeprowadzono pomiary dla ramy bez uszkodzenia w różnych temperaturach towarzyszących pomiarom. W drugiej części, w normalnie panującej w hali laboratoryjnej temperaturze,

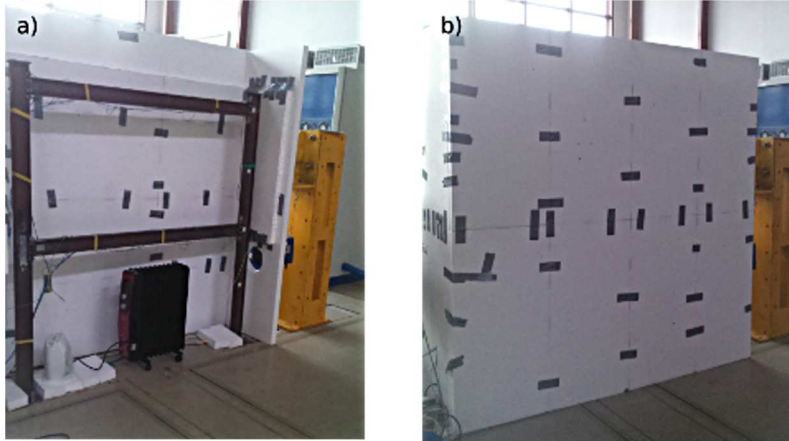
wykonano pomiary charakterystyk dynamicznych układu z uszkodzeniem. Ze względu na wstępną fazę badań dotyczących detekcji uszkodzeń w konstrukcji niemożliwe było trwałe uszkodzenie któregokolwiek z jej elementów. Wprowadzono jednak do układu zaburzenie wywołane poluzowaniem dwóch zewnętrznych rzędów śrub dla każdego z węzłów osobno. Badanie powtórzono trzykrotnie, dla czterech przypadków uszkodzenia, otrzymując w ten sposób 12 zestawów częstotliwości i form odpowiadających uszkodzeniu układu. Jeden zestaw form drgań swobodnych, odpowiadających im częstotliwości wraz z informacją o temperaturze w trakcie pomiaru w dalszej części nazywany jest wzorcem.

Pierwszą część badań (związaną z pomiarami w różnych temperaturach) wykonano w trzech etapach: w normalnej temperaturze wewnątrz hali laboratoryjnej (temperatura zmienia się w zależności od warunków atmosferycznych, w tym nasłonecznienia, jednak jesienią wynosi ona około 20°C), w temperaturze obniżonej (otwarcie bramy wjazdowej do hali w mroźny dzień) oraz w temperaturze podwyższonej (w specjalnie przygotowanej obudowie z płyt styropianowych).

W przypadku obniżenia temperatury najniższa zarejestrowana w czasie pomiaru temperatura wynosiła 9°C, pomimo, że na zewnątrz panowały temperatury ujemne. Podjęto też próbę zbudowania stanowiska na zewnątrz budynku, montując ramę i konstrukcję wsporczą wzbudnika na jednej belce stalowej, jednak zmiana warunków podparcia ramy była na tyle duża, że powodowała zmiany badanych parametrów wskazujące na uszkodzenie układu, dlatego zrezygnowano z przeniesienia stanowiska.

Ze względu na dużą bezwładność termiczną hali laboratoryjnej podgrzanie ramy wymagało wykonania specjalnej obudowy z płyt styropianowych (rys. 8). Temperatura wewnątrz obudowy podnoszona była za pomocą grzejnika olejowego sterowanego poprzez termoregulator połączony z jednym z czujników temperatury. Równomierne ogrzanie układu wymagało zastosowania wentylatora, który wymuszał cyrkulację powietrza wewnątrz obudowy. Pomiaru parametrów dynamicznych dokonywano po ustabilizowaniu temperatury, gdy różnica pomiędzy odczytami z obu czujników nie przekraczała pół stopnia Celsjusza. W temperaturze przekraczającej 40°C mocowanie czujników przyspieszeń do ramy nie było stabilne (czujniki były klejone na wosku), dlatego ograniczono zakres temperatur do górnej wartości nie przekraczającej 36°C.

Pomimo ograniczonego zakresu temperatur w trakcie pomiarów dynamicznych można przyjąć, że był on wystarczający dla potrzeb zadania. Badania nad identyfikacją uszkodzeń w ramie będą odbywały się zawsze w hali laboratorium, a tam, w normalnych warunkach temperatura nie spada poniżej 16°C (jesień) oraz nie wzrasta powyżej 32°C (w lecie i przy pracy maszyn).

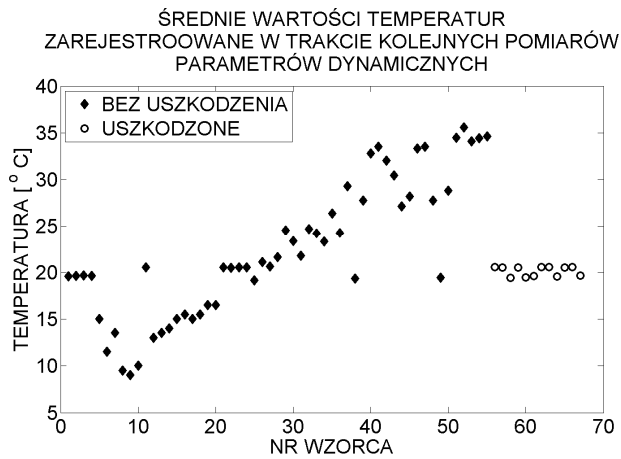


Rys. 8. Stanowisko pomiarowe do badania parametrów dynamicznych w różnych temperaturach. a) rozmieszczenie urządzeń i badanego obiektu wewnątrz obudowy, b) stanowisko w trakcie pomiarów

Fig. 8. Measuring station for vibration testing at different temperatures. a) the location of equipment and the examined frame inside the enclosure, b) measuring station during the experiment

5. Analiza danych pomiarowych

W trakcie badań zarejestrowano 68 wzorców pomiarowych w ustabilizowanej temperaturze w tym: 56 wzorców bez uszkodzenia oraz 12 uszkodzonych. Średnie temperatury ramy w trakcie każdego z pomiarów zestawiono na rys. 9.



Rys. 9. Średnie wartości temperatur towarzyszące każdemu z przeprowadzonych pomiarów

Fig. 9. Average temperature values associated with each of the performed measurements

Wzorzec nr 1 uznano za bazowy, następnie kolejne wzorce uszeregowano według temperatury w trakcie pomiaru.

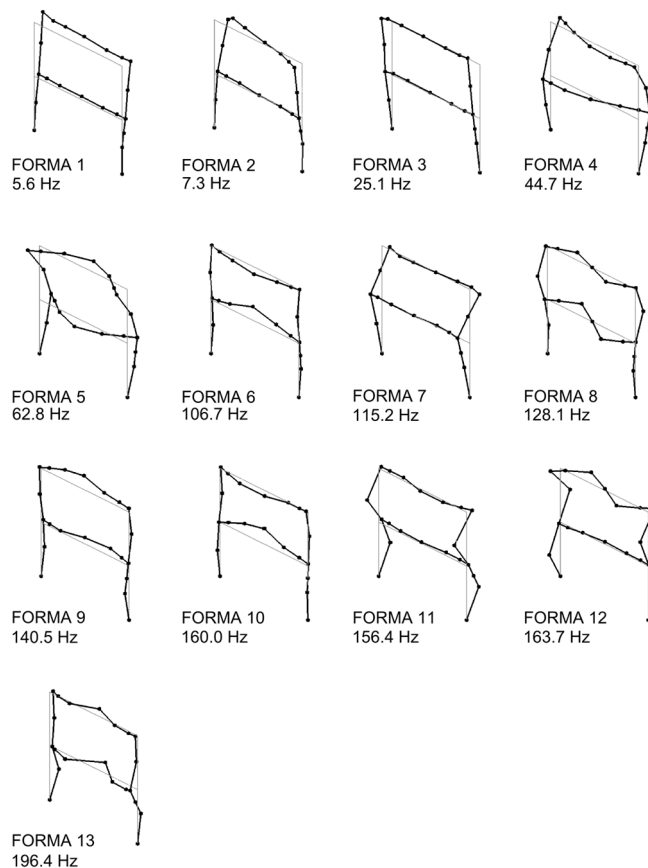
Wykorzystano LMS Test.Lab 15 oraz algorytm PolyMAX ([5]). Postacie i częstotliwości dla wzorca porównawczego zestawiono na rys. 10.

Wzorce pomiarowe porównywano ze wzorcem bazowym. Jako podstawowe kryterium podobieństwa uznano możliwość identyfikacji poszczególnych postaci drgań. Ocena podobieństwa form odbywała się na podstawie wartości współczynnika MAC, wyrażonego wzorem z pracy [6] w postaci:

$$MAC_{jk} = \frac{|\Phi_{mj}^T \Phi_{ak}|^2}{(\Phi_{ak}^T \Phi_{ak})(\Phi_{mj}^T \Phi_{mj})} \quad (1)$$

gdzie: Φ_{mj} - wektor opisujący otrzymaną z pomiarów j-tą formę drgań,

Φ_{ak} - k-ta forma drgań wzorca porównawczego.

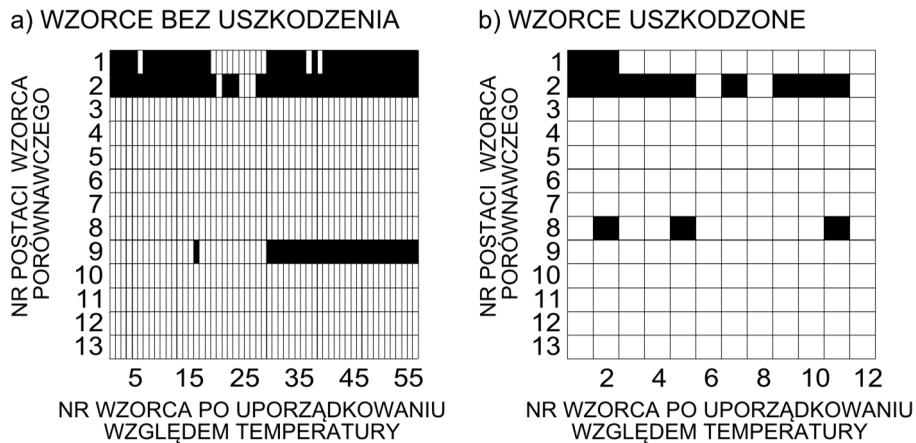


Rys. 10. Formy i częstotliwości drgań otrzymane dla wzorca porównawczego

Fig. 10. Frequencies and forms obtained for the base pattern

Wartość współczynnika większa od 0,8 oznaczała, że badane postaci odpowiadają sobie, więc w kolejnym kroku możliwe jest porównywanie wartości częstotliwości otrzymanych z pomiarów dla odpowiadających sobie form. Ze-stawienie zidentyfikowanych form przedstawiono obrazowo na rys. 11. (zmiana temperatury towarzyszącej kolejnym pomiarom nie jest liniowa, dlatego nie zaznaczono temperatur na osi poziomej, konkretne wartości można sprawdzić analizując rys. 9). W kolumnach zaprezentowano wzorce uporządkowane kolejno ze względu na temperaturę towarzyszącą pomiarom. Każdy wiersz przedstawionych macierzy odpowiada kolejnej postaci wzorca porównawczego. Jeżeli w danym wzorcu zidentyfikowano odpowiednią postać wzorca porównawczego na przecięciu wiersza i kolumny wstawiono białe pole, jeśli dana postać nie wystąpiła pole pozostawiono w kolorze czarnym. Cały wiersz w białym kolorze oznacza, że daną postać zidentyfikowano podczas pomiarów we wszystkich temperaturach. Postaci pierwsza i druga nie zostały zidentyfikowane w większości wzorców, dlatego też w dalszej analizie zostały pominięte, jako niemiarodajne. Ponieważ we wszystkich wzorcach prawie wszystkie postaci zostały zidentyfikowane to wybór wzorca porównawczego (spośród wzorców nieuszkodzonych w zwykle występującej w hali temperaturze) w kontekście prezentowanych poniżej wyników nie ma większego znaczenia.

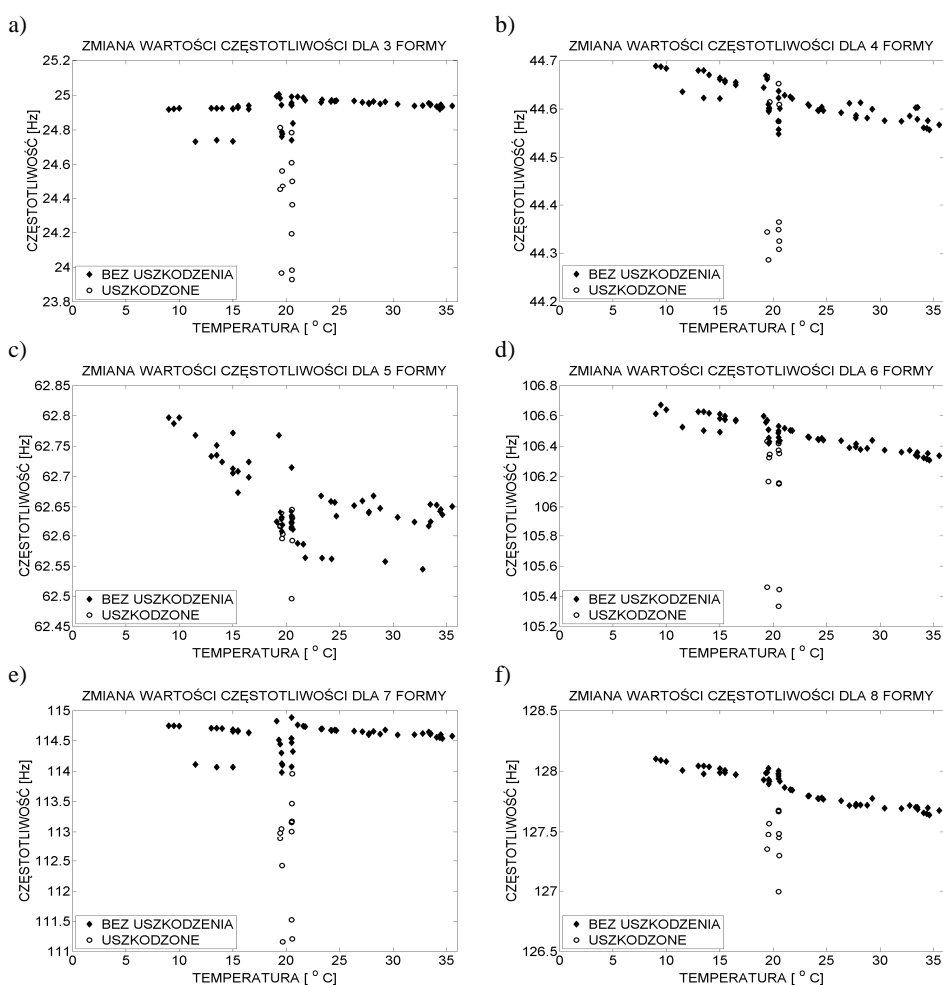
Analizując wartości współczynnika MAC dla wzorców bez uszkodzenia w zależności od temperatury pomiaru stwierdzono, że zmiana temperatury układu nie ma znaczącego wpływu na stopień dopasowania kolejnych form drgań swobodnych poza 9 formą, która w żadnym ze wzorców w temperaturze powyżej 21°C nie została zidentyfikowana.



Rys. 11. Zidentyfikowane postaci odpowiadające postaciom wzorca porównawczego a) dla wzorców bez uszkodzenia i b) dla wzorców uszkodzonych

Fig. 11. Identified modal shapes of base pattern a) for undamaged data set and b) for damaged patterns

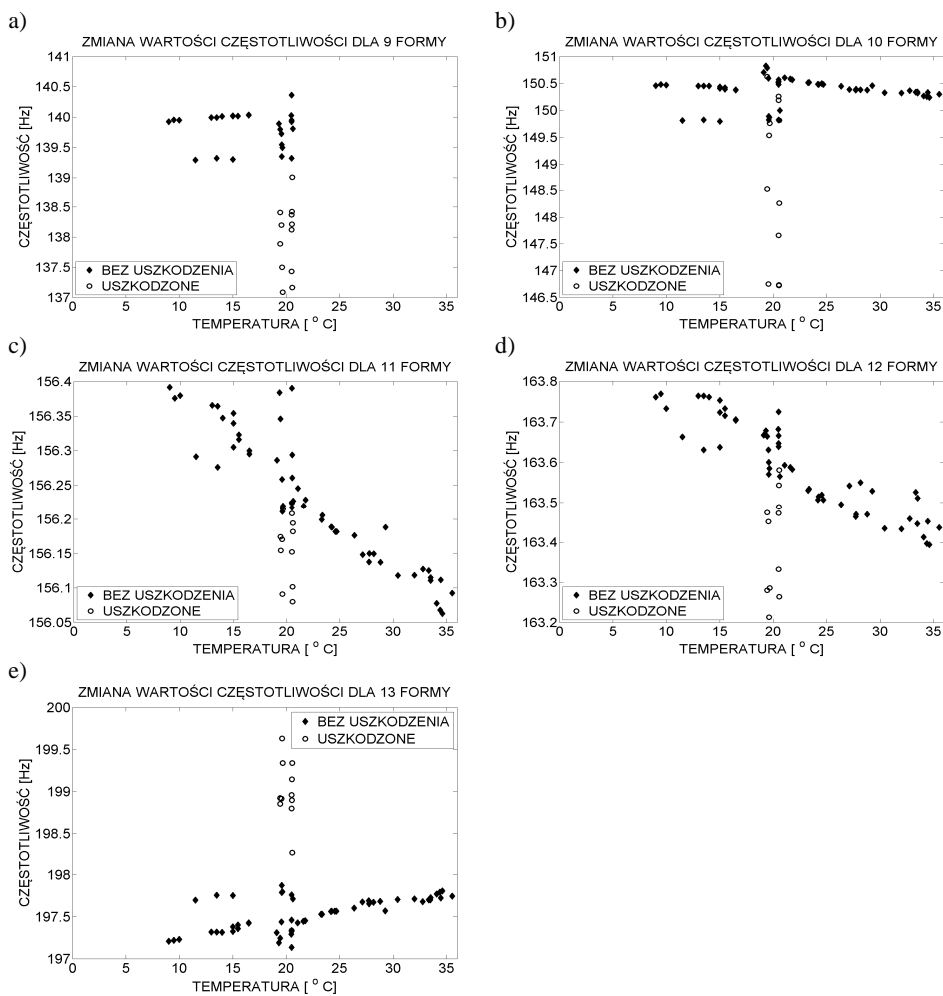
Wyraźny wpływ temperatury jest natomiast zauważalny w przypadku wartości odpowiednich częstotliwości. Na rys. 12. i rys. 13. przedstawiono zmiany częstotliwości odpowiadających kolejnym postaciom wzorca porównawczego. W przypadku większości form, dla wzorców nieuszkodzonych można zaobserwować wyraźny spadek wartości częstotliwości drgań swobodnych (do 0.5 Hz) wraz ze wzrostem temperatury. Aby ocenić czy jest on istotny, na tych samych wykresach pokazano również zmiany spowodowane uszkodzeniem. Dla niektórych z rozpatrywanych form zmiany wywołane obiema przyczynami są zbliżone. Przykładowo dla formy 5, 11 i 12 ocena przyczyny na podstawie wyłącznie war-



Rys. 12. Zmiana wartości częstotliwości dla identyfikowanych postaci odpowiadających od 3 do 8 postaci wzorca porównawczego, w zależności od temperatury w trakcie pomiaru

Fig. 12. Changes in the values of frequency corresponding to the modal forms from 3 to 8, depending on the temperature during the measurement

tości danej częstotliwości jest niemożliwa. Podobna sytuacja ma miejsce dla części wzorców w przypadku formy 4 i 10. Na rys. 12. i rys. 13. zaznaczono uszkodzenia niezależnie od ich typu (uszkodzenia czterech różnych węzłów). Możliwe więc, że dla jednego, bądź kilku z nich zmiany wywołane temperaturą mogą zostać mylnie zinterpretowane jako uszkodzenie. Porównując zmiany wywołane uszkodzeniem i temperaturą można wybrać takie częstotliwości, dla których efekt wywołany zmianą temperatury jest dużo mniejszy niż efekt wywołany uszkodzeniem (postać 3, 7, 8 i 13). Należałoby rozważyć możliwość wykorzystania w trakcie dalszych badań związanych z detekcją uszkodzeń właśnie tych postaci.



Rys. 13. Zmiana wartości częstotliwości dla identyfikowanych postaci odpowiadających od 9 do 13 postaci wzorca porównawczego, w zależności od temperatury w trakcie pomiaru

Fig. 13. Changes in the values of frequency corresponding to the modal forms from 9 to 13, depending on the temperature during the measurement

6. Wnioski

Temperatura towarzysząca pomiarom dynamicznym ma wpływ na częstotliwości drgań swobodnych układu. Zmiany te nie są pomijalne, ponieważ ich wielkość jest porównywalna ze zmianami wywołanymi przez uszkodzenie konstrukcji. W kontekście monitorowania stanu konstrukcji brak informacji o temperaturze może obniżać dokładność wykrywania uszkodzeń, jeśli w procedurze detekcji przyjęto jako parametry do identyfikacji właśnie częstotliwości drgań (jak np. w [7]). Dlatego też, jeśli detekcja uszkodzeń będzie bazowała na informacji o częstotliwościach drgań, należy bądź to zgromadzić odpowiednią bazę wzorców zapewniających określenie reakcji układu na zmiany temperatury, bądź ograniczyć się do przeprowadzenia pomiarów w stałych warunkach temperaturowych. Należy zaznaczyć, że przeprowadzone badania zostały zawężone do zakresu 9-35,5°C. Dla niektórych konstrukcji praca w tak szerokim zakresie temperatur nie będzie miała miejsca, są jednak i takie, dla których prezentowany zakres jest jedynie wąskim przedziałem wśród wszystkich możliwych do wystąpienia temperatur (np. dla obiektów mostowych, w których temperatura pracy może zmieniać się nawet od -25 do +50°C [8]). Można się więc spodziewać, że rola jaką odgrywa temperatura w tego typu konstrukcjach jest jeszcze większa.

Podziękowania

Do badań wykorzystano aparaturę zakupioną w projekcie nr POPW.01.03.00-18-012/09 z Funduszy Strukturalnych w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Regionalnego.

Literatura

- [1] Wilde K.: Modal Diagnostics Of Civil Engineering Structures, Gdańsk University Of Technology Publishers, Gdańsk 2008.
- [2] Ko J.M., Ni Y.Q.: Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges, *Engineering Structures* 27, 2005, s. 1715-1725.
- [3] Eleni N. Chatzi, Minas D. Spiridonakos: Structural Identification and Monitoring based on Uncertain/Limited Information, *MATEC Web of Conferences* 24,01003, 2015.
- [4] Uhl T., Berczyński S., Hanc A., Sękiewicz Ł.: Rozproszony system monitorowania mostów, *DIAGNOSTYKA'35*.
- [5] LMS Test.Lab MIMO FRF Testing 15A, User manual, Siemens Industry Software NV.
- [6] UHL T.: Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
- [7] Ziaja D., Miller B.: Detekcja uszkodzeń na przykładzie dwukondygnacyjnej ramy portalowej z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury – Journal Of Civil Engineering, Environment And Architecture, JCEEA*, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 579-588.

- [8] Onysyk H.: Analiza zmian temperatury stalowej konstrukcji mostu przez Wisłę w Puławach, Drogi i Mosty, nr 1/2012, s. 35-52.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE CHANGE OF DYNAMIC PARAMETERS OF A TWO-STOREY STEEL PORTAL FRAME

S u m m a r y

One of the non-destructive testing methods is damage detection based on changes in dynamic parameters of the structure. For this purpose modal analysis could be used, where natural frequencies and forms are calculated using measured data. During experiment an examined structure is excited by external force with known value, and its vibration (accelerations in some selected points) are measured. This method was used in presented research. Unfortunately not only material characteristics or geometric and static feature of the system have an influence of the dynamic parameters. Also the external conditions during measurements can change the dynamic response of the structure. The aim of this subject was checking, is temperature affect on the dynamic parameters and how big are the changes, the source of which is the temperature. To evaluate the scale of described changes, in a laboratory model of two-storey steel portal frame, in each of beam-to-column connection separately, four from eight bolts were loosed. This action had to simulate the damage of the structure. In this paper the effects of temperature and simulated damages were compared.

Keywords: structural health monitoring (SHM), modal analysis

Przesłano do redakcji: 22.02.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.