

IDENTYFIKACJA CECH DYNAMICZNYCH KONSTRUKCJI URZĄDZENIA MECHATRONICZNEGO DO TRENINGU LOKOMOTORYCZNEGO Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY MODALNEJ

MODAL ANALYSIS OF PROTOTYPE MECHATRONIC DEVICE

Sławomir Kciuk, Damian Gąsiorek, Sławomir Duda – Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Politechnika Śląska

W artykule przedstawiono zastosowanie eksperymentalnej analizy modalnej do wyznaczania właściwości dynamicznych konstrukcji. Opisano przebieg oraz wyniki badań konstrukcji prototypowego urządzenia do treningu lokomotorycznego. W trakcie badań wyznaczano częstotliwości oraz postacie drgań rezonansowych obiektu, a także widmowe funkcje przejścia. Wyniki badań zostały wykorzystane do modyfikacji właściwości dynamicznych urządzenia oraz do weryfikacji modeli numerycznych obiektu będącego przedmiotem badań.

In this paper it has been presented the application of experimental modal analysis to determine the dynamic properties of the structure. The course and results of the investigations of construction of a prototype device for locomotor training have been described. During the tests, frequency of the resonant modes of vibration object, and spectral transfer functions were determined. The investigation's results were used to modify the dynamic properties of the device and to verify numerical models of the object being studied.

Wstęp

Rozwój technologii oraz zwiększenie wymagań techniczno-ekonomicznych jakie stawia się przed producentami wszelkich wyrobów oraz duża konkurencja panująca na rynkach zbytu, wymusza od producentów ciągłą modernizację istniejących oraz wdrażanie do produkcji nowych wyrobów.

Jednym z kryteriów stosowanych w ocenie jakości wyrobu jest poziom drgań oraz związany z nim hałas generowany podczas pracy urządzenia. Poziom drgań uzależniony jest od siły wymuszającej oraz właściwości konstrukcji, wynikających z parametrów takich jak masa, sprężystość, tłumienie. Redukcja drgań może polegać na ustaleniu zakresu dopuszczalnych obciążeń urządzenia lub modyfikacji cech dynamicznych obiektu. W każdym przypadku jednak konieczne jest wyznaczenie charakterystyk dynamicznych maszyny, a do tego celu najlepiej jest zastosować analizę modalną. Daje to możliwość uzyskania modelu modalnego obiektu rzeczywistego, który przedstawiony jest za pomocą zbioru postaci drgań, współczynników tłumienia oraz częstości własnych [1, 2]. Posiadana wiedza w postaci parametrów uzyskanych z pomiaru, pozwala przewidywać zachowanie się obiektu badanego w stanach dynamicznych, tak więc istnieje możliwość modyfikacji konstrukcji, oceny stanu technicznego obiektu oraz weryfikacji modeli numerycznych.

Zastosowanie analizy modalnej do badania układów mechanicznych

W klasycznej analizie modalnej, parametry modalne zidentyfikowanego obiektu są wyznaczone na podstawie pomiaru charakterystyk częstotliwościowych zmierzonych na obiekcie rzeczywistym za pomocą czynnego eksperymentu identyfikacyjnego polegającego na sterowanym wymuszeniu drgań układu i pomiarze odpowiedzi w postaci widma przyspieszenia drgań. Na podstawie znajomości widma odpowiedzi i wymuszenia dokonuje się identyfikacji przebiegu charakterystyk

częstotliwościowych obiektu [3]. W większości znanych metod identyfikacji, pierwszym krokiem procedury jest wyznaczenie odpowiedzi impulsowej układu, a następnie na podstawie jej znajomości estymuje się parametry modelu modalnego. Jedną z bardziej znanych metod identyfikacji modeli modalnych na podstawie pomiaru odpowiedzi jest metoda LSCE (Least Squares Complex Exponential), za pomocą której aproksymuje się przebieg funkcji korelacji sumą zanikających wykładniczo funkcji harmonicznych. Metoda LSCE realizowana jest w dziedzinie czasu dając globalne oszacowanie parametrów modelu w postaci częstości własnych i modalnych współczynników tłumienia.

Badania modelowe konstrukcji prototypowego urządzenia mechatronicznego do treningu lokomotorycznego

Możliwość samodzielnego poruszania się jest jedną z podstawowych funkcji życiowych człowieka. Wypadki lub choroby upośledzające ruchowo w znacznym stopniu zmniejszają samodzielną zdolność chodu bądź całkowicie ją utraciły, lekarze w ramach rehabilitacji starają się przywrócić pełną lub możliwie największą sprawność fizyczną. Stosowane są zarówno zabiegi fizykalne jak i ćwiczenia lecznicze mające na celu zwiększenie ruchomości stawów i siły mięśniowej. Przywrócenie zdolności poruszania się wymaga również praktykowania przez pacjenta chodu tak często jak to jest możliwe przy jego stanie zdrowia. Prototypowe urządzenie do treningu lokomotorycznego ma służyć rehabilitacji pacjentów szpitalnych ponownie uczących się chodzić, jako układ nadążny wspomagający odciążenie kończyn dolnych w trakcie chodu pacjenta w przestrzeni ograniczonej ruchem suwnicy.



Rys. 1. Prototypowe urządzenie do treningu lokomotorycznego

Doświadczalna analiza modalna

Na prototypie przeprowadzono szereg badań, w tym także badania modalne, do których należał test modalny z wymuszeniem impulsowym. Jego celem było wyznaczenie częstości drgań swobodnych oraz określenie charakterystyk rezonansowych korpusu. Pierwszy etap eksperymentu polegał na wyborze punktu i kierunku wymuszenia obiektu, następnie dobrano odpowiednią końcówkę młotka modalnego zapewniającą najlepsze wymuszenie obiektu w przyjętym paśmie częstości. Ze względu na przebieg widma wymuszenia wybrano końcówkę średnio – twardą, która zapewniła odpowiednie płaskie widmo wymuszenia w paśmie badanych częstości. Zastosowane czujniki przyspieszeń prawidłowo odwzorowały amplitudę w zakresie częstości 1 – 500 Hz, a przebieg funkcji koherencji ze względu na wartość bliską 1 w badanym paśmie, wskazał na możliwość prowadzenia badań modalnych dla analizowanego obiektu.

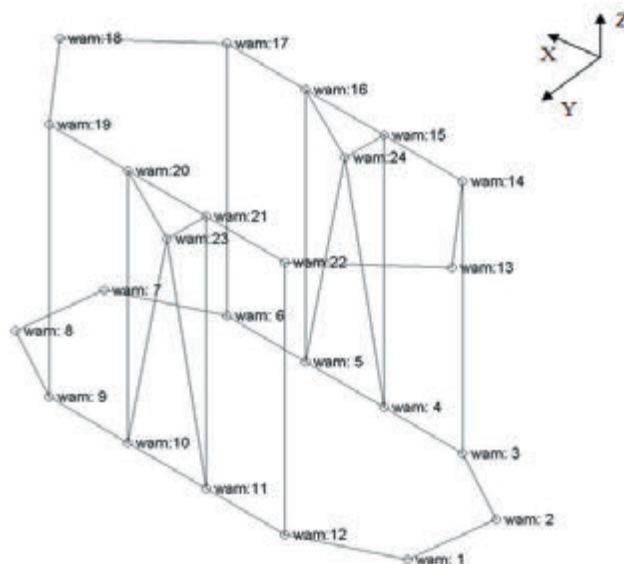
Dla celów badań przyjęto model geometryczny badanego korpusu ramienia kombajnu, który schematycznie przedstawiono na rysunku 2.

W czasie pomiarów konstrukcja spoczywała na podłożu, na podkładkach gumowych.

Do realizacji pomiarów zastosowano następujący zestaw aparatury pomiarowej:

1. analizator sygnałów SigLab 20-42 DSPT Technology,
2. trójosiowy czujnik typu ICP symbol M356A02, czułość 10 mV/g, zakres 0,5 Hz do 6 kHz,
3. młotek modalny, z czujnikiem siły, zakres 1 kHz, zakres siły 22000 N, czułość 0.23 mV/N.

Jako wymuszenie drgań układu zastosowano wymuszenie impulsowe za pomocą specjalnego młotka do badań modalnych, wyposażonego w czujnik siły co umożliwiło pomiar i rejestrację przebiegu wymuszenia. Wymuszenie impulsowe za pomocą młotka modalnego przykładano we wszystkich punktach opracowanej siatki modelu geometrycznego obiektu badań. Pomiar przebiegu siły wymuszającej oraz sygnału odpowiedzi na przyłożone wymuszenie, rejestrowano jako przyspieszenie drgań w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach w każdym z punktów. Na podstawie zmierzonych przebiegów wyestymowano widmowe funkcje przejścia (WFP) mierzone między przebiegiem siły wymuszającej, a przebiegami przyspieszeń drgań mierzonych w rozpatrywanych punktach [4, 6],



Rys. 2. Przyjęty model geometryczny obiektu badań

przebiegi WFP zostały uśrednione w dziedzinie częstości i zarejestrowane do dalszej analizy. Przebieg funkcji koherencji zwyczajnej między mierzonymi równocześnie przebiegami sygnału wymuszenia i odpowiedzi były stale monitorowane w czasie pomiaru, w celu zapewnienia możliwie najwyższej jakości danych pomiarowych.

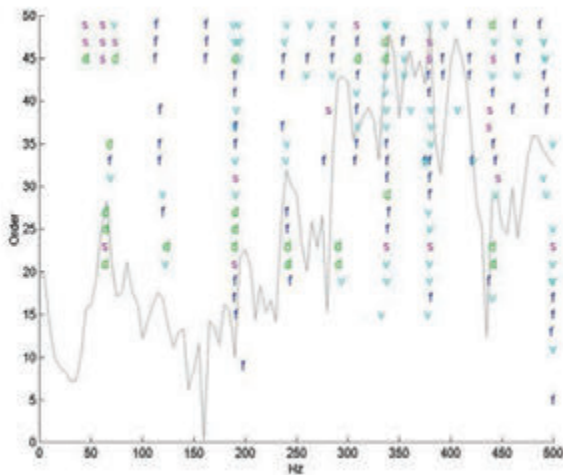
Do opracowania wyników analizy modalnej wykorzystano pakiet oprogramowania Matlab/Vioma. Do estymacji parametrów modelu modalnego zastosowano metodę LSCE. Metoda ta oparta na teorii drgań układów o wielu stopniach swobody, pozwala wyznaczyć globalne estymaty parametrów modelu modalnego badanego obiektu na podstawie zbioru zarejestrowanych danych pomiarowych. Estymacja biegunów zmierzonych WFP (widmowa funkcja przejścia) jest wykonywana po transformacji danych do dziedziny czasu i aproksymowaniu impulsowych funkcji przejścia sumą wykładniczo zanikających drgań o częstościach i tłumieniach określających poszukiwane bieguny [5, 7]. Wyznaczenie postaci drgań własnych (PDW) odbywa się poprzez aproksymację średniokwadratową w dziedzinie częstości zmierzonych WFP (rys. 3) przy pomocy charakterystyk o biegunach wyestymowanych w pierwszym etapie procedury badawczej [4]. Identyfikowano rzeczywiste PDW, które cechują się równoczesnym przechodzeniem przez położenie równowagi wszystkich punktów badanego obiektu.

Prezentowane wyniki dotyczą pierwszego sposobu podparcia korpusu podczas badań.

W rezultacie, w badanym paśmie częstości zidentyfikowano 13 postaci drgań własnych, które przedstawiono w tabeli 1.

Teoretyczna analiza modalna w środowisku Ansys

W celu przeprowadzenia analizy modalnej rozpatrywanego układu zdecydowano się na wykonanie modelu w środowisku Ansys. Modele fizyczne wykonane w środowisku CAD i importowane do środowiska Ansys są modelami przestrzennymi, do podziału których należy stosować elementy typu SOLID.



Rys. 3. Diagram stabilizacyjny

Ze względu na budowę modelu zdecydowano się na wykonanie modelu (rys. 4), który zdyskretyzowano elementami belkowymi. Takie podejście jest słuszne i dostosowane do typu konstrukcji.

Konstrukcja ramy nośnej (rys. 4) została zaprojektowana na bazie komponentów katalogowych firmy Bosch Rexroth. Na jej strukturę składają się elementy w postaci dwóch belek podłużnych, najdłuższych w całej konstrukcji (10-profil_8_120x80_L), dwóch belek poprzecznych zamykających ramę górną konstrukcji nośnej (11-profil_8_120x80_L) oraz sześciu pionowych podpór (8-profil_8_80x80_L) będących statywami konstrukcji. W celu zapewnienia dostatecznej sztywności ramy nośnej, powyższe elementy połączono ze sobą w części górnej, na kierunku wzdłużnym, poprzez kątowniki (5-8_T2_80_Zn) za pomocą profili (6-profil_8_80x40_L). Ramę na kierunku poprzecznym wzmocniono tzw. zastrzałami (zukosowanymi od

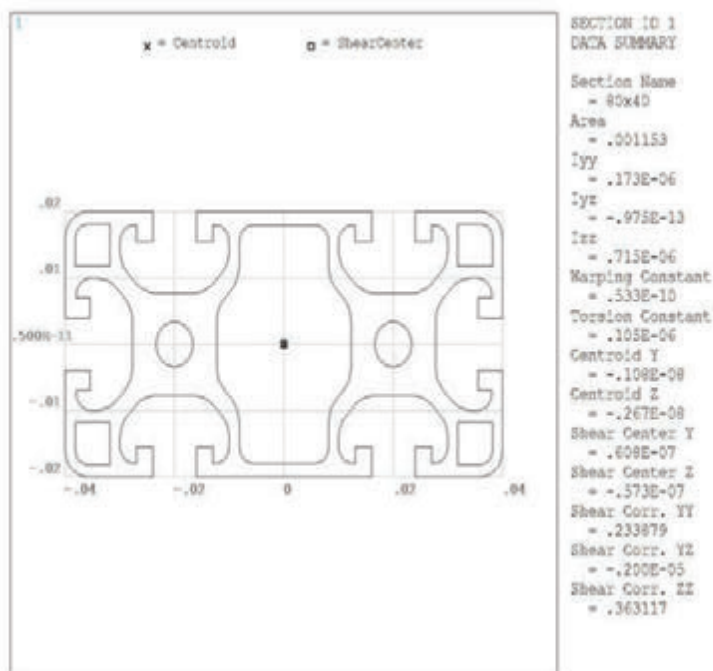


Rys. 4. Schemat ramy nośnej z wykazem elementów składowych [8]

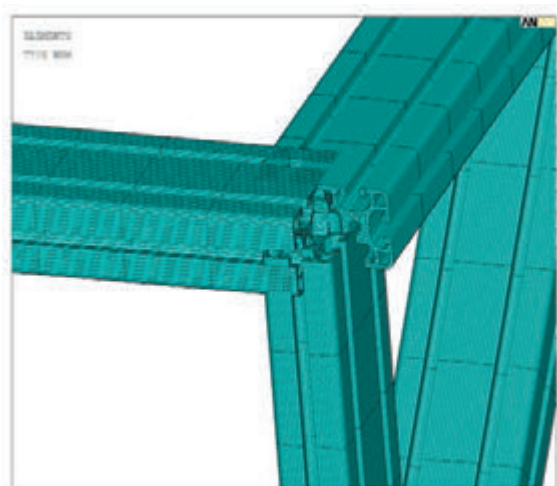
czoła profilami -4-profil_8_80x40_L), a część dolną- podobnie jak powyżej, profilami (7) za pomocą kątowników. Pionowe podpory zespolono ze sobą dzięki tzw. ramie dolnej, utworzonej z kwadratowych profili (16,17-profil_8_80x80_L). Konstrukcję ramy nośnej wyposażono w regulowane stopki (9) z silikonowymi nakładkami pełniącymi funkcję wibroizolatorów. Wszystkie komponenty składowe powyższej konstrukcji, zostały połączone ze sobą za pomocą połączeń śrubowych z wykorzystaniem techniki dedykowanej przez producenta, firmy ITEM. Model ramy podzielono na elementy belkowe BEAM189 w programie Ansys. Do wykonania modelu belkowego wyznaczono przekroje (rys. 5), które przyłożono zgodnie z rysunkiem 4 do odpowiednich elementów ramy.

Do modelu przyjęto, że rama swobodnie spoczywa na podłożu, materiałem zdefiniowanym w modelu jest aluminium. Przyjęto działanie siły grawitacji w osi Z.

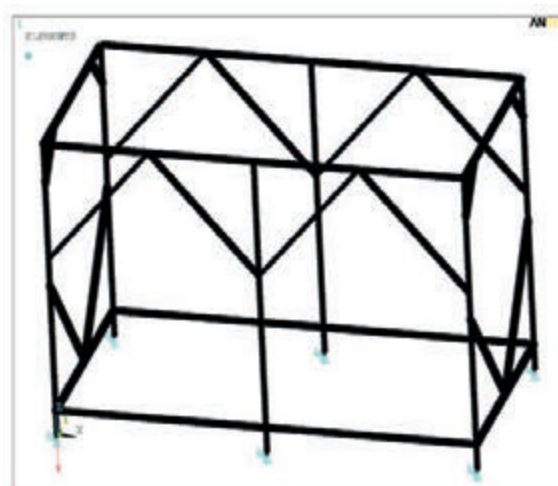
W miejscu styku ramy z podłożem, w każdym węźle odebrano możliwość przemieszczenia translacyjnego wzdłuż osi X, Y oraz Z.



Rys. 5. Przykładowy profil przyjęty do dyskretyzacji ramy [8]



Rys. 6. Elementy ramy po dyskretyzacji



Rys. 7. Model ramy z przyjętymi warunkami brzegowymi

Tab. 1. Zidentyfikowane częstotliwości drgań własnych

Lp.	Wyniki z doświadczalnej analizy modalnej		Wyniki z teoretycznej analizy modalnej	Błąd względny
	Częstotliwość [Hz]	Tłumienie [%]	Częstotliwość [Hz]	Δ [%]
1.	44,97	16,1	50,215	11,6633
2.	61,92	10,8	72,54	17,1512
3.	64,18	11,0	86,87	35,3537
4.	73,56	9,05	92,42	25,6389
5.	120,61	6,65	109,60	9,128596
6.	190,83	1,83	198,57	4,05597
7.	238,81	3,92	221,79	7,127005
8.	281,57	3,13	292,72	3,95994
9.	308,79	2,18	320,21	3,69831
10.	337,85	2,56	342,36	1,33491
11.	379,18	1,6	399,74	5,42223
12.	438,67	2,8	439,73	0,24164
13.	441,7	2,3	440,35	0,305637

Po przeprowadzeniu analizy numerycznej wyznaczono błąd względny w celu sprawdzenia poprawności modelu numerycznego i przyjętych założeń upraszczających.

Błąd wyznaczono, jako:

$$\Delta = \frac{Cz_klas - Cz_num}{Cz_klas} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: Cz_klas – częstotliwość z doświadczalnej analizy modalnej

Cz_num – częstotliwość z teoretycznej analizy modalnej

Wnioski

Zastosowanie analizy modalnej w dynamice maszyn jest niezwykle szerokie, w szczególności do badania i identyfikacji cech dynamicznych maszyn elektromechanicznych. Badania

takie przeprowadza się na drodze teoretycznej i eksperymentalnej. Porównanie wyników badań doświadczalnych i symulacji komputerowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych wskazuje na wystarczającą zbieżność uzyskanych rezultatów. Świadczy to o prawidłowym przyjęciu założeń w procesie modelowania oraz zastosowaniu odpowiednich metod numerycznych. Dla częstości 3 i 4 błąd względny jest wysoki, natomiast dla pozostałych modów wartość błędu nie przekracza 10%. Uzyskane wyniki świadczą o poprawności przyjętego modelu numerycznego i założeń upraszczających. W procesie modelowania ważnym elementem jest dobór odpowiedniego modelu obliczeniowego. W przypadku modeli fizycznych CAD, często po importowaniu do środowiska MES, obliczenia prowadzi się dla modelu bryłowego, zapominając o poprawności modelowania i przyjęciu adekwatnych elementów skończonych dostosowanych do typu konstrukcji.

Literatura

- [1] Giergiel J., Uhl T., Identyfikacja układów mechanicznych, PWN Warszawa 1990
- [2] Ewins D. J., Modal Testing Theory and practice. John Wiley & Sons Inc. 1995
- [3] Uhl T., Komputerowo wspomagana metoda identyfikacji modeli konstrukcji mechanicznych. WNT Warszawa 1997
- [4] Świtoński E., Mężyk A., Kciuk S., Zastosowanie analizy modalnej do wyznaczania i optymalizacji charakterystyk dynamicznych układów napędowych, ZN Katedry Mechaniki Stosowanej Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Gliwice 2000
- [5] Couturier C., Cassoret B., Lecointe J-P., Czapla T., Świdorski K., Electrical machines stators vibration analysis – compared methods, Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej, nr 22, Gliwice 2003
- [6] Czapla T., Experimental Modal Analysis of Electric Engine Stator, Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej, nr 21, Gliwice 2003
- [7] Czapla T., Kciuk S., Badania modalne osiowego rozkładu charakterystyk dynamicznych stojana generatora dużej mocy, Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej 24/2004 (oddano do druku)
- [8] Gąsiorek D., Gembalczyk G., Kciuk S., Machoczek T., Numerical verification of effort in mechanical construction of prototype manipulator for rehabilitation, Modelling and optimization of physical systems. Wydaw. Katedry Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, 2013

