

Krzysztof LEHRICH¹
Krzysztof LIS¹

ANALIZA MODALNA KORPUSU STOJAKA OBRABIARKI CNC

Artykuł prezentuje kompleksowe podejście do identyfikacji postaci i częstości drgań własnych obrabiarkowej konstrukcji nośnej na przykładzie korpusu stojaka centrum frezarskiego pionowego. Przedstawiony sposób postępowania obejmuje wstępne badania symulacyjne z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych oraz weryfikacyjne badania eksperymentalne. W artykule zaprezentowano model korpusu w konwencji MES oraz stanowisko pomiarowe do badań eksperymentalnych. Efektem przeprowadzonych badań jest zestawienie uzyskanych wyników i ocena rozbieżności wyników analiz MES w odniesieniu do badań eksperymentalnych.

1. WPROWADZENIE

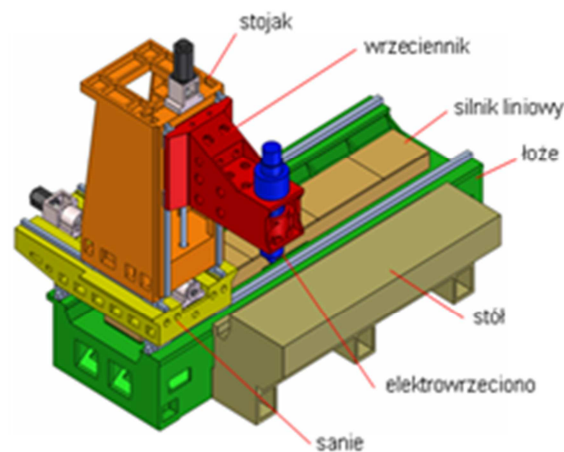
Właściwości dynamiczne obrabiarek mają bardzo istotny wpływ na proces skrawania i uważane są za jedno z najważniejszych dla oceny układu konstrukcyjnego obrabiarki. Opisywane są często charakterystykami częstotliwościowymi, które pozwalają na ocenę stabilności układu obrabiarka - proces skrawania [1],[2]. Właściwości dynamiczne mogą decydować o chropowatości powierzchni, sterowaniu i emitowanym hałasie. Analiza właściwości dynamicznych struktur nośnych obrabiarek skrawających powinna być jednym z podstawowych etapów realizowanych podczas konstruowania obrabiarki. Na etapie projektowania można do tego celu wykorzystać Metodę Elementów Skończonych (MES) i model wirtualny, który jest podstawą do opracowania dokumentacji konstrukcyjnej. Zastosowanie MES nie daje jednak pełnego i dokładnego opisu właściwości dynamicznych konstrukcji tak złożonej jak konstrukcja nośna obrabiarki. Jest to efektem występowania wielu połączeń stykowych wynikających z łączenia poszczególnych korpusów i układów prowadnicowych [2]. Dlatego też zasadnym jest badanie właściwości dynamicznych obrabiarek na drodze eksperymentalnej (np. przez przeprowadzenie eksperymentalnej analizy modalnej). W tym przypadku wymagany jest jednak obiekt rzeczywisty. Takie podejście wskazuje na potrzebę zbudowania prototypu, co nie zawsze jest możliwe. Na przykład w odniesieniu do obrabiarek ciężkich nie jest praktykowane z uwagi na duże koszty i krótkie czasy realizacji zamówienia. W przypadku obrabiarek produkowanych seryjnie budowa prototypu jest jak najbardziej zasadna i w zależności od zastosowanej

¹ Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska w Gliwicach,
E-mail: krzysztof.lehrich@polsl.pl

metody badawczej pozwala uzyskać bardziej lub mniej kompletne informacje o badanym obiekcie. Celem pracy było zatem wykazanie, że dla prostych korpusów obrabiarkowych bez połączeń stykowych można przeprowadzać dostatecznie dokładne analizy MES, co wykazano porównując wyniki badań modelowych z wynikami badań eksperymentalnych.

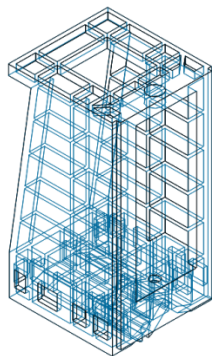
2. PRZEDMIOT BADAŃ

Badania przeprowadzono na korpusie stojaka o postaci wymiarowej i kształtowej zaproponowanej w wyniku optymalizacji [3]. Badania przeprowadzono zaraz po wykonaniu korpusu na tymczasowym stanowisku eksperymentalnym. W chwili obecnej korpus ten stanowi część stanowiska badawczo-dydaktycznego opracowanego w Katedrze Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej [4],[5]. W oryginalnej postaci wymiarowo-kształtowej, zaproponowanej przez konstruktorów, korpus stanowił jeden z elementów struktury nośnej centrum frezarskiego, którego konstrukcję opracowano w CBKO w Pruszkowie (rys. 1).

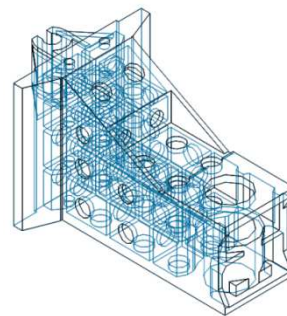


Rys. 1. Model CAD centrum frezarskiego [7]
Fig. 1. CAD model of milling center [7]

a)



b)

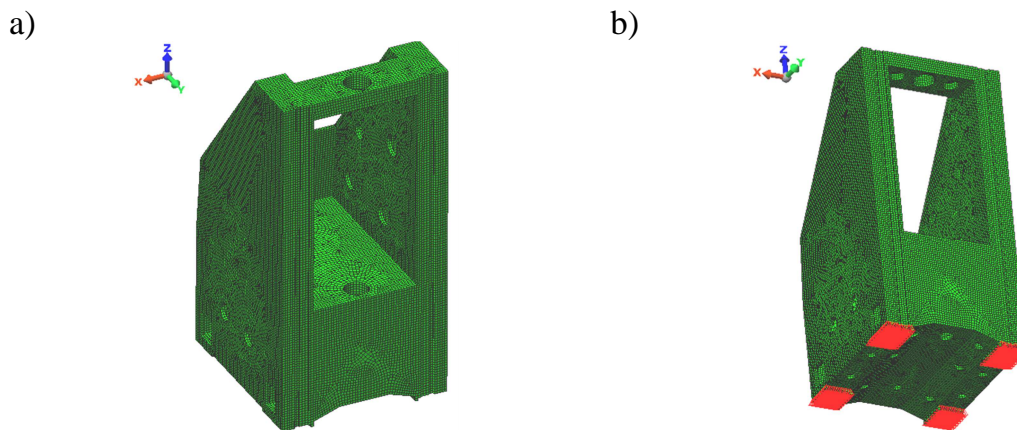


Rys. 2. Uźebrowanie korpusów centrum frezarskiego [5]: a) stojak, b) wrzeciennik
Fig. 2. Ribs of milling center bodies [5]: a) the column, b) the fixed headstock

Korpus stojaka wykonany został z żeliwa w procesie odlewania. Korpusy centrum frezarskiego, podobnie jak większość korpusów obrabiarkowych, charakteryzują się gęstym uźebrowaniem, co pokazano na rys. 2.

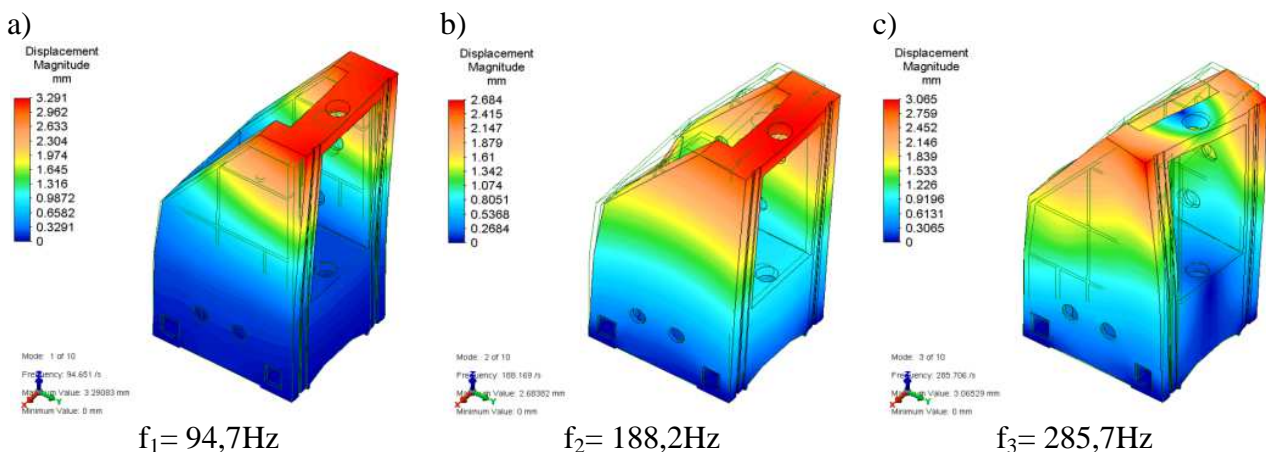
3. MODEL DYSKRETNY STOJAKA I WYNIKI ANALIZ MES

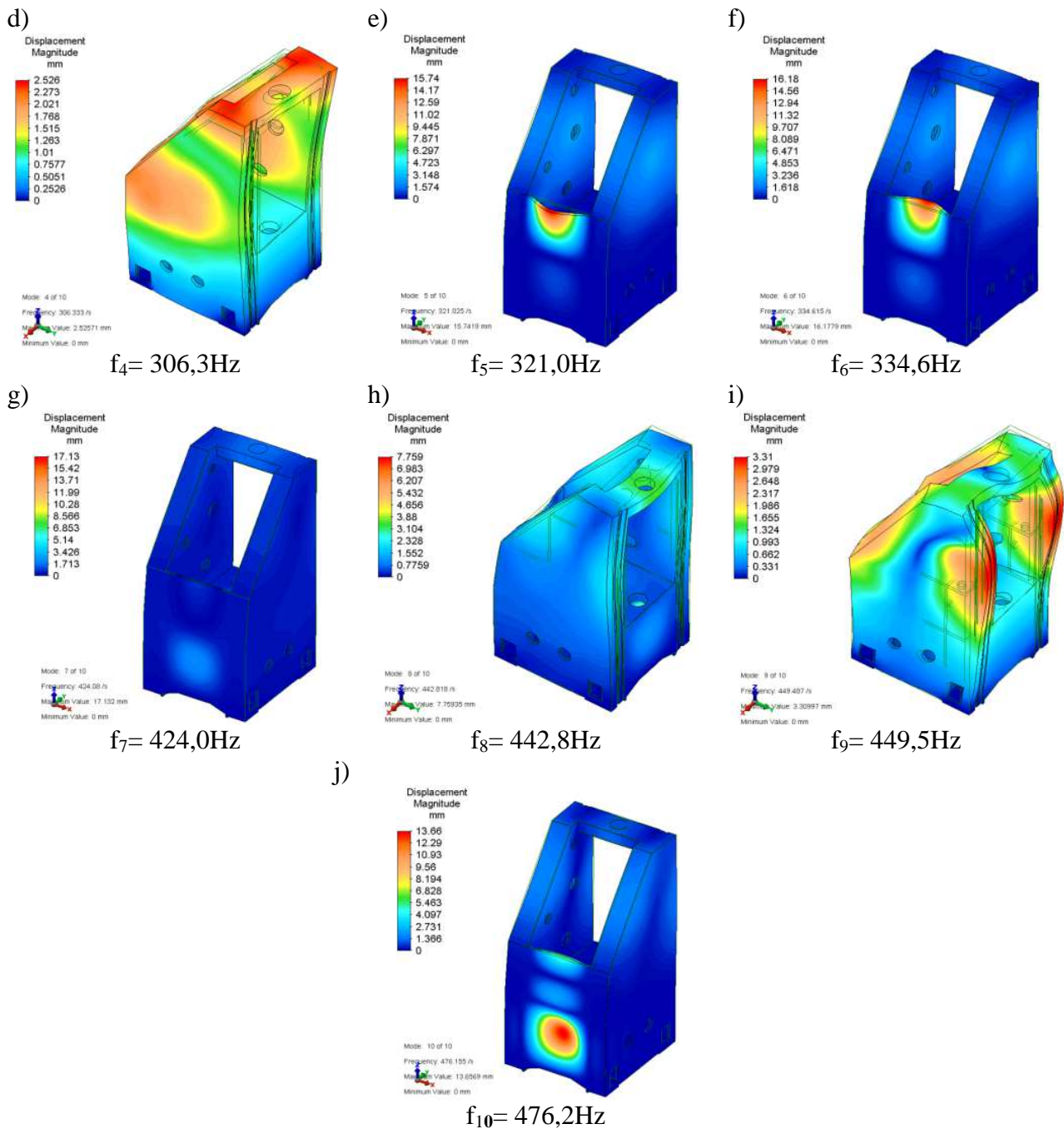
Badania symulacyjne przeprowadzono w wykorzystując oprogramowanie Autodesk Algor Simulation 2011. Model poddano dyskretyzacji elementami bryłowymi, w przewadze ośmiowęzłowymi (rys. 3a). W rzeczywistości, na tymczasowym stanowisku eksperymentalnym, korpus przykręcony został do stalowej płyty umieszczonej na podstawie w postaci stalowej ramy. Z tego względu w modelu do analiz MES, w miejscu mocowania korpusu do płyty odebrano wszystkie stopnie swobody (rys. 3b).



Rys. 3. Model stojaka w konwencji MES: a) model dyskretny, b) miejsca utwierdzenia stojaka
Fig. 3. FEA model of column: a) the discrete model, b) the place of fixing

Celem analizy MES była identyfikacja dziesięciu pierwszych częstości i postaci drgań własnych. Wyniki analizy zestawiono na rys. 4.



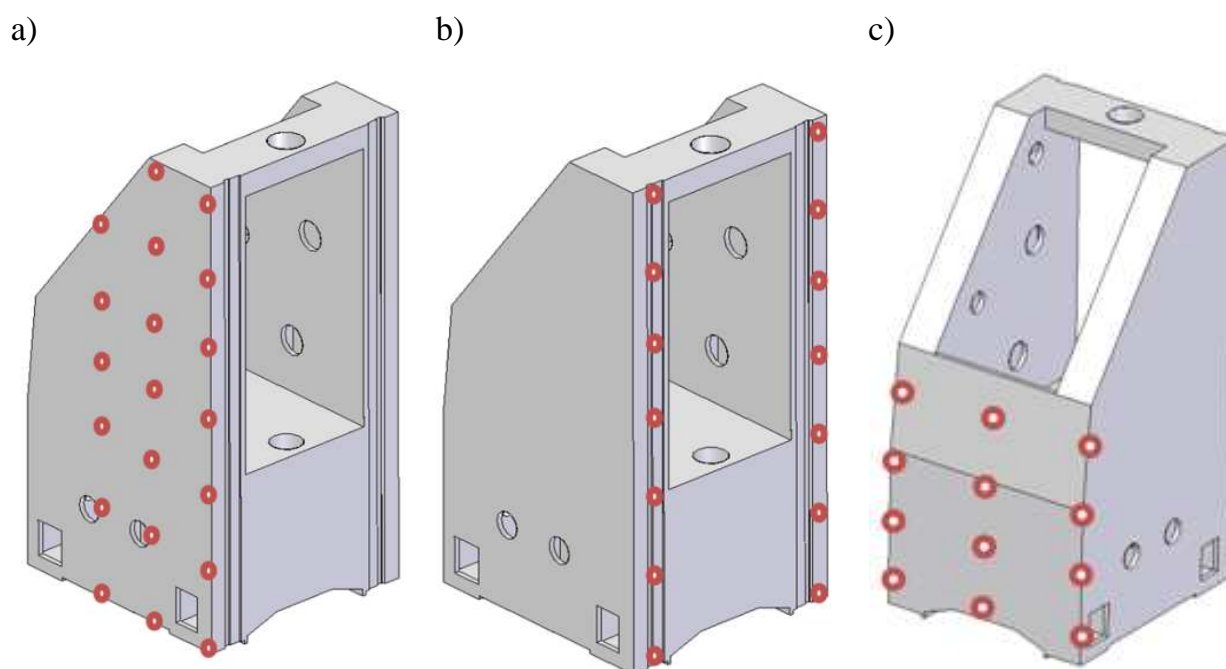


Rys. 4. Częstości i postaci drgań własnych
 Fig. 4. Mode shapes and natural frequencies

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE KORPUSU WRZECIENNIKA POD KĄTEM OCENY PARAMETRÓW MODALNYCH

Badania weryfikacyjne pod kątem oceny częstości i postaci drgań własnych przeprowadzono z zastosowaniem doświadczalnej analizy modalnej bazującej na zasadzie

wzajemności Maxwella. Wymuszenie w metodzie stanowił impuls generowany przez młotek modalny, odpowiedź natomiast rejestrowano przy pomocy czujnika przyśpieszeń. Podczas badań, na korpusie zaznaczono siatkę punktów stanowiących miejsca wymuszeń młotkiem modalnym, czujnik natomiast umiejscowiono w wybranym punkcie. Siatka punktów pomiarowych była równomierna, tj. posiadała równe odstępów w obydwu osiach, które w tym przypadku wynosiły 21cm x 21cm. Rozmieszczenie punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 5. Badania przeprowadzono w trzech etapach, analizując kolejno postacie drgań ściany bocznej, przedniej i tylnej korpusu.



Rys. 5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na korpusie stojaka: a) ściana boczna, b) ściana przednia, c) ściana tylna

Fig. 5. Position of measurement points on the bodies of column: a) side wall, b) front wall, c) back wall

Jako wymuszenie zastosowano duży (ok. 1kg) młotek modalny PCB Piezotronics 086D20 (rys. 6) wyposażony w końcówkę średniej twardości (patrz tabela 1). Odpowiedź rejestrowano za pomocą toru pomiarowego, składającego się z akcelerometru trójosiowego 4326A (rys. 7) oraz wzmacniacza firmy B&K, model NEXUS typu 2692. Charakterystykę czujnika przedstawiono w tabeli 2. Do akwizycji danych wykorzystano komputer pomiarowy, z modułem dwurdzeniowego kontrolera NI PXI-8108 w obudowie NI PXI-1042 firmy National Instruments oraz kartę pomiarową multi I/O NI PXI 6230.

Zarówno komputer pomiarowy z kartami multi I/O jaki i oprogramowanie, przy pomocy którego realizowano identyfikację parametrów modalnych, wchodzi w skład Zintegrowanego Systemu Badań Obrabiarek w Warunkach Przemysłowych (ZSBOWP), rozwijanego w ramach prac wykonywanych w projekcie rozwojowym prowadzonym w Katedrze Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej [6].



Rys. 6. Młotek do badań modalnych – PCB Piezotronics 086D20
Fig. 6. Modal hammer – PCB Piezotronics 086D20



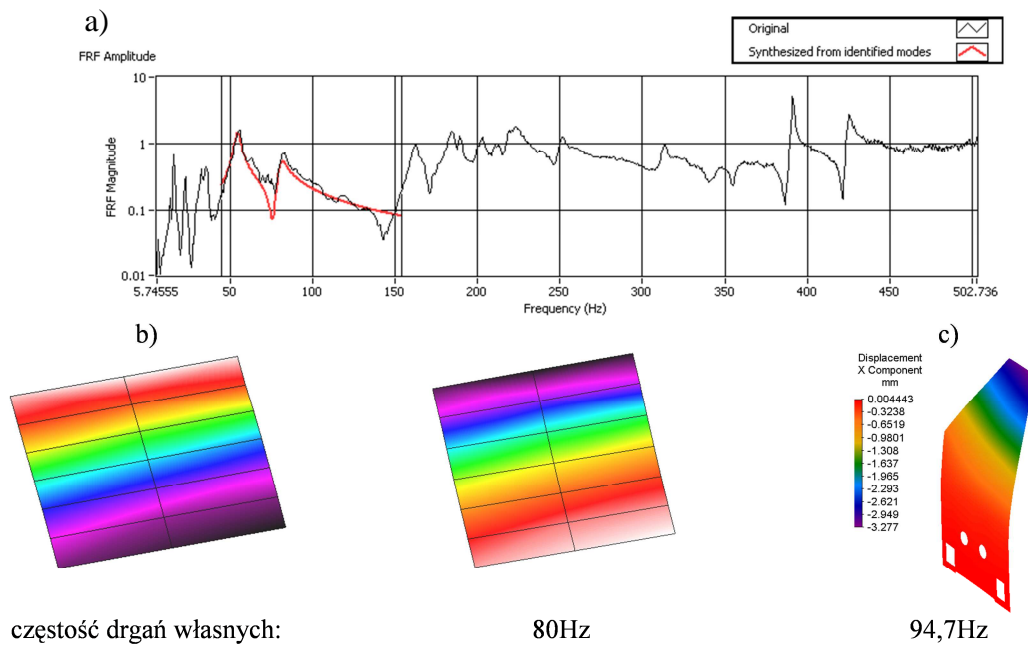
Rys. 7. Akcelerometr trójosiowy 4326A
Fig. 7. Triaxial accelerometer 4326A

Tabela 1. Parametry młotka modalnego
Table 1. Parameters of modal hammer

Parametr	SI
Czułość ($\pm 15\%$)	0.23mV/N
Zakres pomiaru	$\pm 22,000\text{N pk}$
Zakres częs. (-10 dB)(Twarda końcówka)	1kHz
(-10 dB) (Średniej twardości końcówka)	700Hz
(-10 dB) (Miękka końcówka)	450Hz
(-10 dB) (Super miękka końcówka)	400Hz
Częstotliwość rezonansowa	$\geq 12\text{kHz}$
Nieliniowość	$\leq 1\%$
Parametry elektryczne	Standard ICP
Napięcie wzbudzenia	18 to 30 VDC
Stała prądu wzbudzenia	2 to 20mA
Impedancja wyjścia	$<100\text{ohm}$
Wyjściowa polaryzacja napięcia	8 to 12 VDC
Stała czasowa wyładowania	$\geq 1400\text{sec}$
Parametry fizyczne	
Materiał czujnika	Kwarc
Masa młotka	1.1kg
Średnica zakończenia	5.1cm
Średnica końcówki	5.1cm

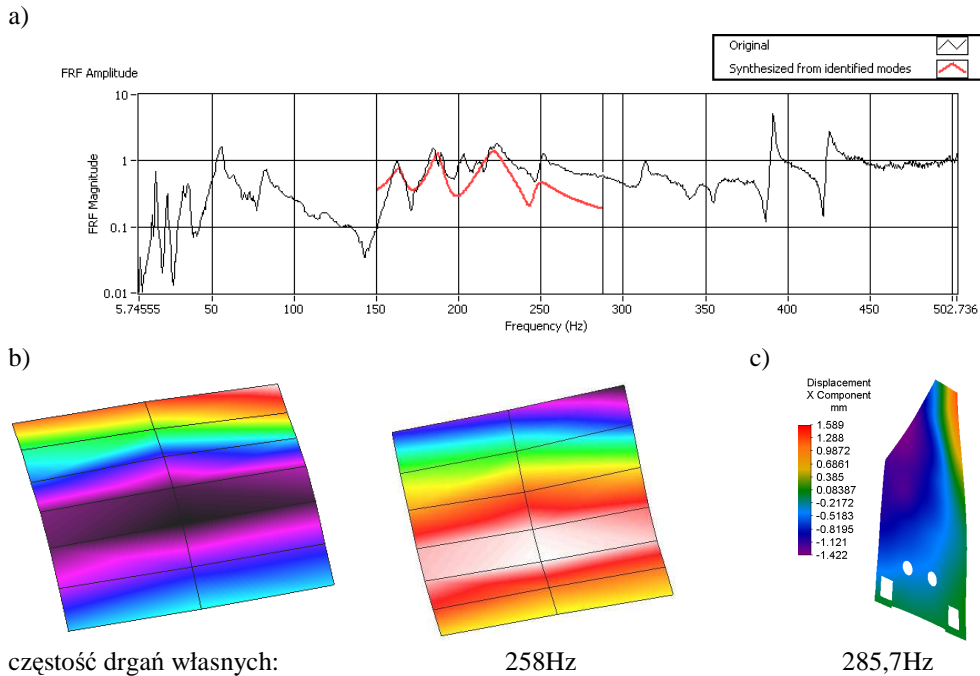
Tabela 2. Parametry akcelerometru trójosiowego 4326A
Table 2. Parameters of triaxial accelerometer 4326A

Parametr	SI
Zakres częstotliwości:	1 – 8000Hz
Temperatura pracy:	-55 – 230C
Masa:	17gram
czułość:	3pC/g
Maksymalny zakres pomiarów	2000g
Przyłącze wyjściowe.:	10 – 32 UNF
Standard wyjścia:	Charge – PE
Częstotliwość rezonansowa:	30kHz
Zakres zakłóceń (rms) \pm	0,3mg



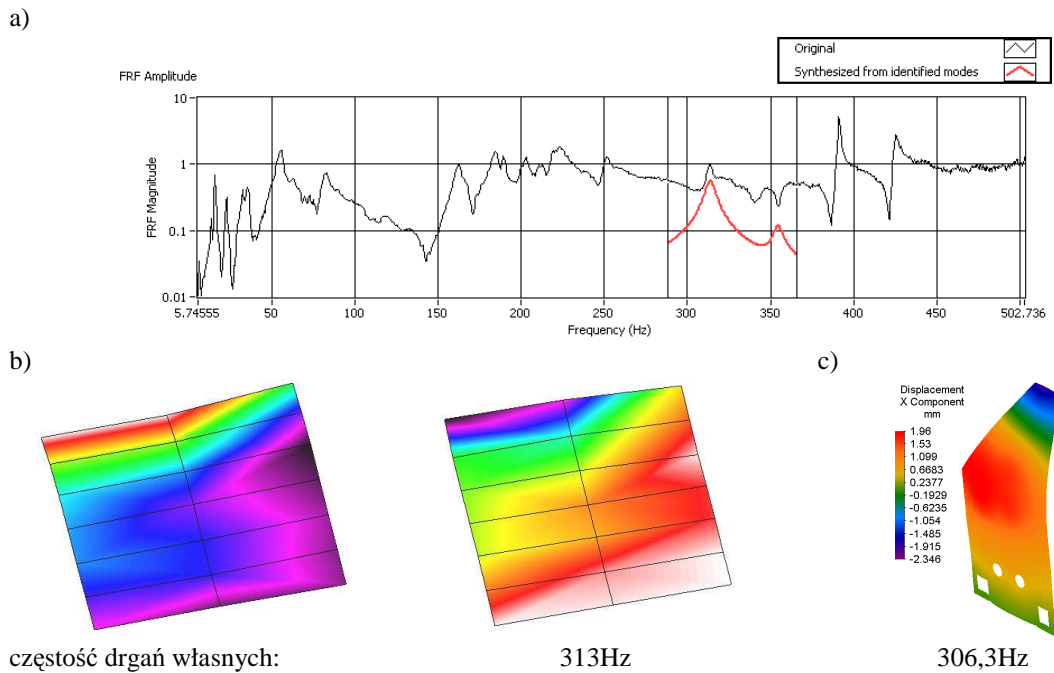
Rys. 8. Porównanie wyników analiz MES i badań eksperymentalnych pierwszej częstości i postaci drgań własnych dla ściany bocznej: a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, b) postać drgań z badań eksperymentalnych, c) postać drgań z analiz MES

Fig. 8. Comparison of FEA and experimental results of first mode shape and natural frequency for side wall: a) the amplitude-frequency characteristic, b) the mode shape from experimental research, c) the mode shape from FEM analysis



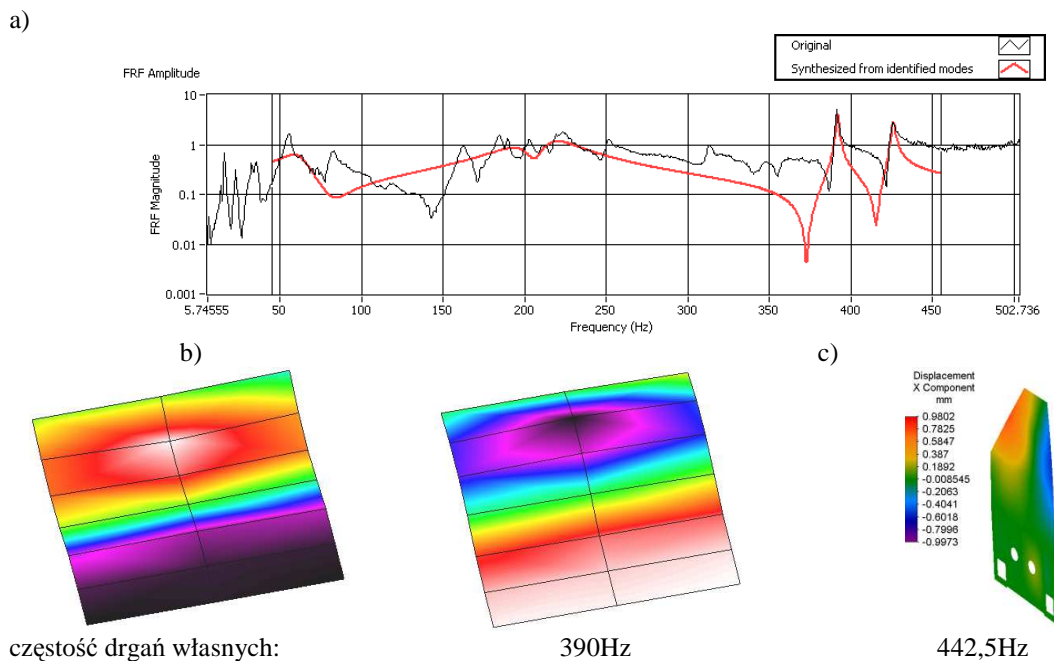
Rys. 9. Porównanie wyników analiz MES i badań eksperymentalnych trzeciej częstości i postaci drgań własnych dla ściany bocznej: a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, b) postać drgań z badań eksperymentalnych, c) postać drgań z analiz MES

Fig. 9. Comparison of FEA and experimental results of third mode shape and natural frequency for side wall: a) the amplitude-frequency characteristic, b) the mode shape from experimental research, c) the mode shape from FEM analysis



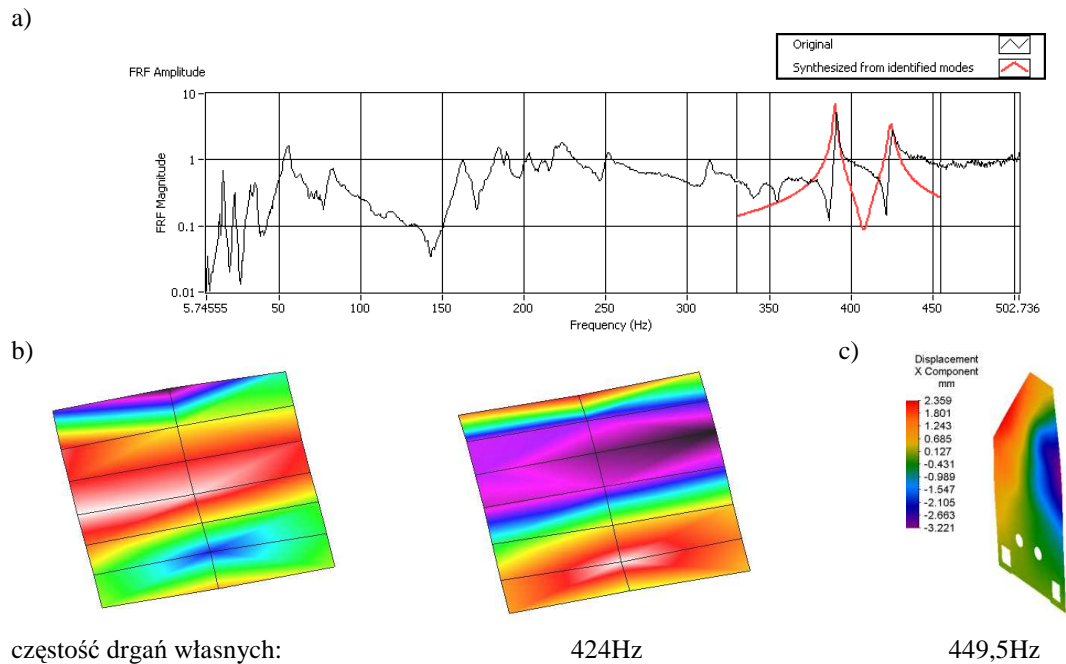
Rys. 10. Porównanie wyników analiz MES i badań eksperymentalnych czwartej częstości i postaci drgań własnych dla ściany bocznej: a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, b) postać drgań z badań eksperymentalnych, c) postać drgań z analiz MES

Fig. 10. Comparison of FEA and experimental results of fourth mode shape and natural frequency for side wall: a) the amplitude-frequency characteristic, b) the mode shape from experimental research, c) the mode shape from FEM analysis



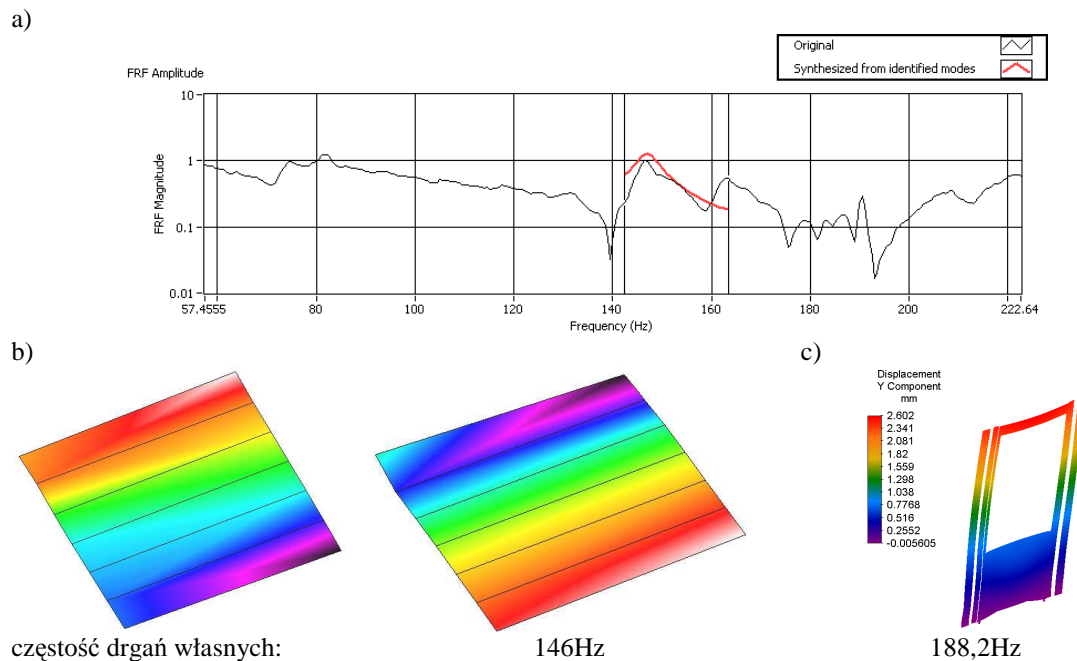
Rys. 11. Porównanie wyników analiz MES i badań eksperymentalnych siódmej częstości i postaci drgań własnych dla ściany bocznej: a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, b) postać drgań z badań eksperymentalnych, c) postać drgań z analiz MES

Fig. 11. Comparison of FEA and experimental results of seventh mode shape and natural frequency for side wall: a) the amplitude-frequency characteristic, b) the mode shape from experimental research, c) the mode shape from FEM analysis



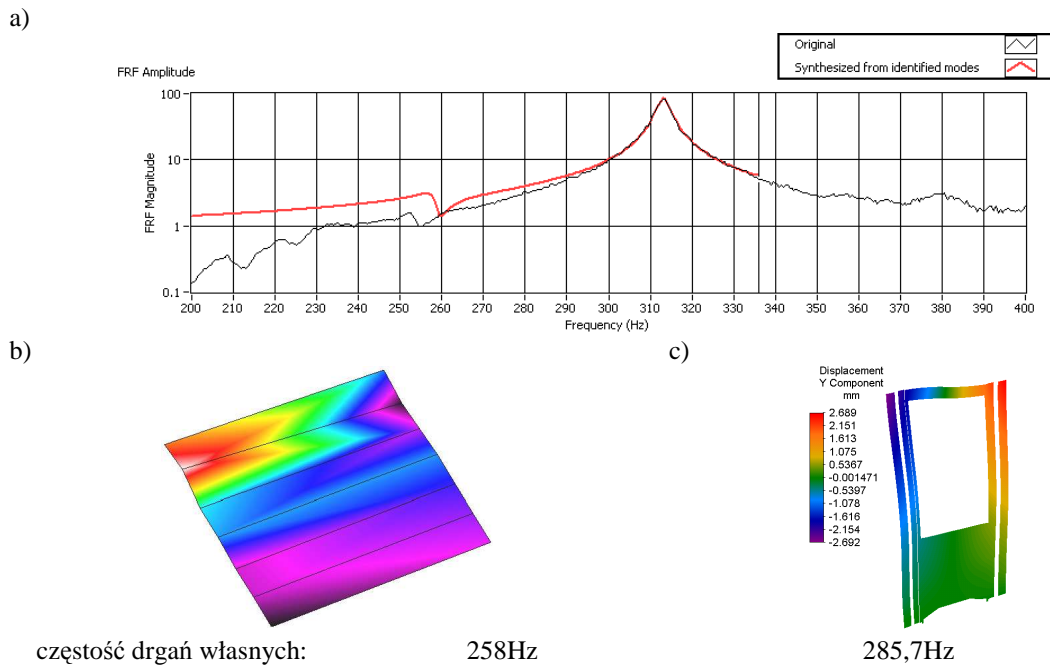
Rys.12. Porównanie wyników analiz MES i badań eksperymentalnych dziewiątej częstości i postaci drgań własnych dla ściany bocznej: a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, b) postać drgań z badań eksperymentalnych, c) postać drgań z analiz MES

Fig.12. Comparison of FEA and experimental results of ninth mode shape and natural frequency for side wall: a) the amplitude-frequency characteristic, b) the mode shape from experimental research, c) the mode shape from FEM analysis



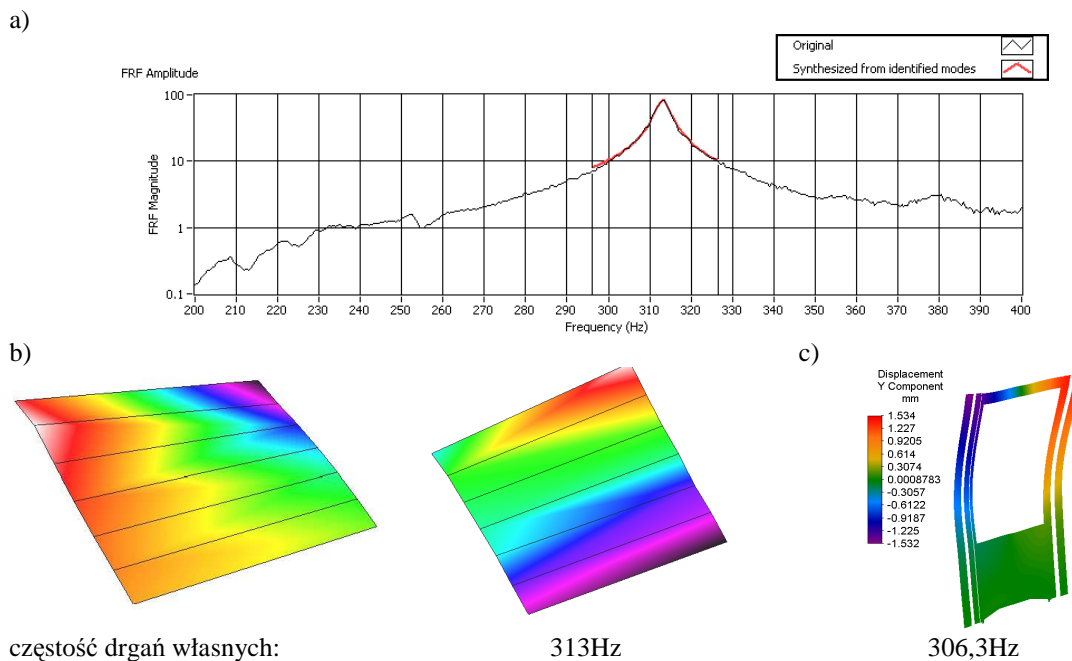
Rys. 13. Porównanie wyników analiz MES i badań eksperymentalnych drugiej częstości i postaci drgań własnych dla ściany przedniej: a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, b) postać drgań z badań eksperymentalnych, c) postać drgań z analiz MES

Fig. 13. Comparison of FEA and experimental results of second mode shape and natural frequency for front wall: a) the amplitude-frequency characteristic, b) the mode shape from experimental research, c) the mode shape from FEM analysis



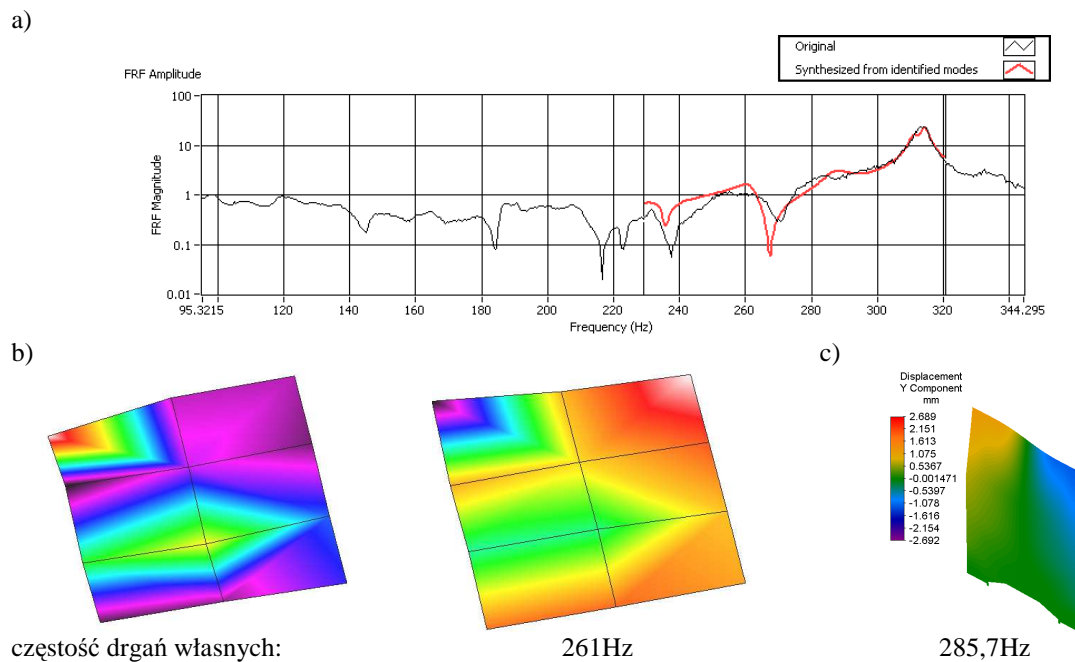
Rys.14. Porównanie wyników analiz MES i badań eksperymentalnych trzeciej częstości i postaci drgań własnych dla ściany przedniej: a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, b) postać drgań z badań eksperymentalnych, c) postać drgań z analiz MES

Fig.14. Comparison of FEA and experimental results of third mode shape and natural frequency for front wall: a) the amplitude-frequency characteristic, b) the mode shape from experimental research, c) the mode shape from FEM analysis



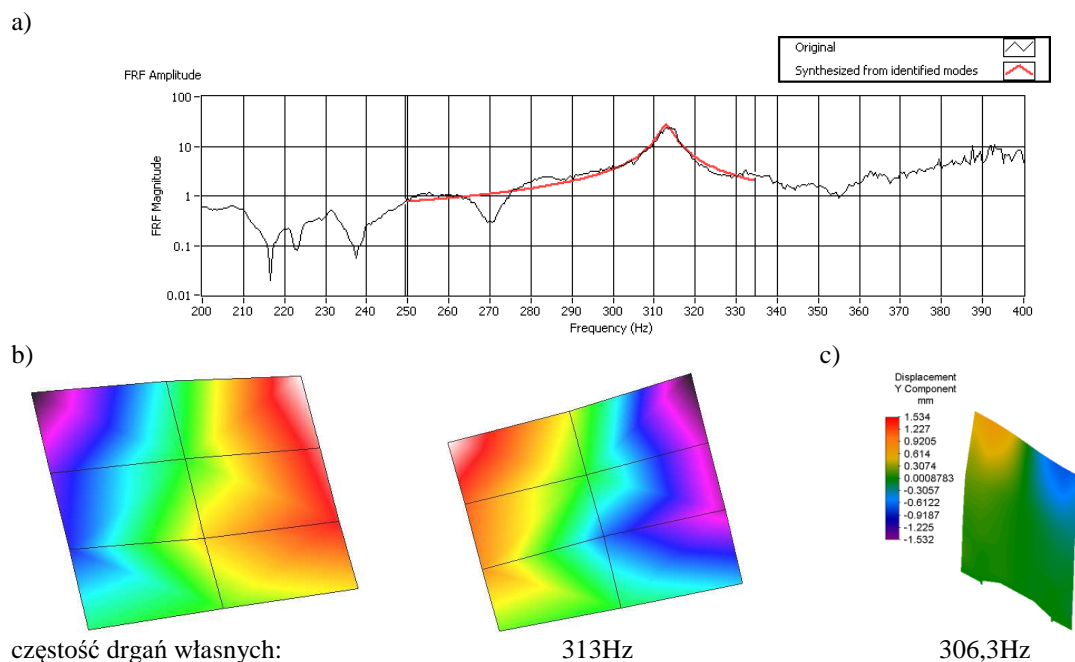
Rys. 15. Porównanie wyników analiz MES i badań eksperymentalnych czwartej częstości i postaci drgań własnych dla ściany przedniej: a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, b) postać drgań z badań eksperymentalnych, c) postać drgań z analiz MES

Fig. 15. Comparison of FEA and experimental results of fourth mode shape and natural frequency for front wall: a) the amplitude-frequency characteristic, b) the mode shape from experimental research, c) the mode shape from FEM analysis



Rys. 16. Porównanie wyników analiz MES i badań eksperymentalnych trzeciej częstości i postaci drgań własnych dla ściany tylnej: a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, b) postać drgań z badań eksperymentalnych, c) postać drgań z analiz MES

Fig. 16. Comparison of FEA and experimental results of third mode shape and natural frequency for back wall: a) the amplitude-frequency characteristic, b) the mode shape from experimental research, c) the mode shape from FEM analysis



Rys. 17. Porównanie wyników analiz MES i badań eksperymentalnych czwartej częstości i postaci drgań własnych dla ściany tylnej: a) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, b) postać drgań z badań eksperymentalnych, c) postać drgań z analiz MES

Fig. 17. Comparison of FEA and experimental results of fourth mode shape and natural frequency for back wall: a) the amplitude-frequency characteristic, b) the mode shape from experimental research, c) the mode shape from FEM analysis

W oparciu o przeprowadzone badania eksperymentalne zidentyfikowano pierwsze postacie i częstotliwości drgań własnych. Uzyskane wyniki zestawiono poniżej z wynikami uzyskanymi z analiz MES korpusu. Na rysunkach pokazano charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe, na których kolorem czarnym przedstawiono przebiegi pomiarów eksperymentalnych a kolorem czerwonym - estymowany model modalny.

Porównując wyniki analiz MES i badań eksperymentalnych stwierdzono zadowalającą zbieżność wyników dotyczących częstości drgań własnych. Porównanie wyników przedstawiono w tabelach 3 do 6 oraz na rysunkach 18 do 20. Powstałe rozbieżności mogą wynikać z innego sposobu utwierdzenia korpusu w modelu MES w stosunku do badań eksperymentalnych. W modelu MES nie uwzględniono bowiem konstrukcji stalowej, do której zamocowany jest korpus. Podobieństwo zauważyć można również w porównaniu postaci drgań własnych przedstawionym na rysunkach 8 do 17.

Tabela 3. Porównanie wyników analizy częstości drgań własnych dla pomiaru na ścianie bocznej
Table. 3. Comparison of natural frequency results from FEM analysis and experimental research for side wall

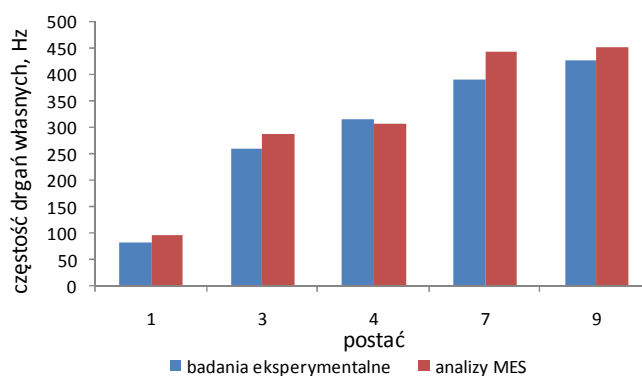
Postać	Częstość drgań własnych, Hz		Rozbieżność wyników analiz MES w odniesieniu do wyników badań eksperymentalnych, %
	Badania eksperymentalne	Analizy MES	
1	80	94,7	18,4
3	258	285,7	10,7
4	313	306,3	2,1
7	390	442,5	13,5
9	424	449,5	6,0

Tabela 4. Porównanie wyników analizy częstości drgań własnych dla pomiaru na ścianie przedniej
Table. 4. Comparison of natural frequency results from FEM analysis and experimental research for front wall

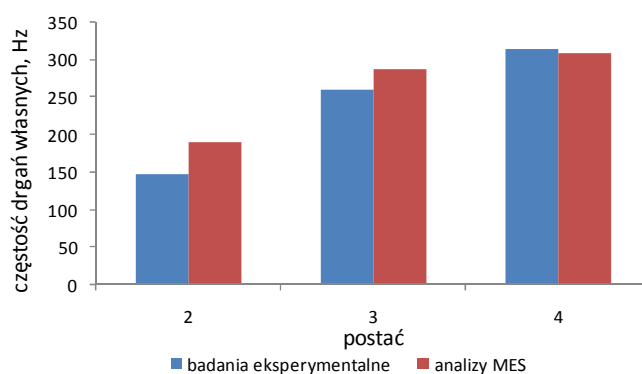
Postać	Częstość drgań własnych, Hz		Rozbieżność wyników analiz MES w odniesieniu do wyników badań eksperymentalnych, %
	Badania eksperymentalne	Analizy MES	
2	146	188,2	28,9
3	258	285,7	10,7
4	313	306,3	2,1

Tabela 5. Porównanie wyników analizy częstości drgań własnych dla pomiaru na ścianie tylnej
Table. 5. Comparison of natural frequency results from FEM analysis and experimental research for back wall

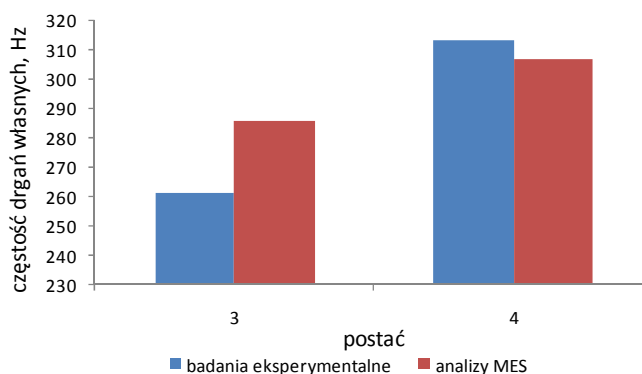
Postać	Częstość drgań własnych, Hz		Rozbieżność wyników analiz MES w odniesieniu do wyników badań eksperymentalnych, %
	Badania eksperymentalne	Analizy MES	
3	261	285,7	9,5
4	313	306,3	2,1



Rys. 18. Zestawienie wyników częstości drgań własnych z analiz MES i badań eksperymentalnych dla ściany bocznej
 Fig. 18. Comparison of natural frequencies results from FEA and experimental research for side wall



Rys. 19. Zestawienie wyników częstości drgań własnych z analiz MES i badań eksperymentalnych dla ściany przedniej
 Fig. 19. Comparison of natural frequencies results from FEA and experimental research for front wall



Rys. 20. Zestawienie wyników częstości drgań własnych z analiz MES i badań eksperymentalnych dla ściany tylnej
 Fig. 20. Comparison of natural frequencies results from FEA and experimental research for back wall

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Potrzeba doskonalenia parametrów dynamicznych konstruowanych maszyn, a w szczególności maszyn realizujących procesy obróbkowe, wymusza na konstruktorach

konieczność identyfikacji charakterystyk dynamicznych już na drodze projektowania. Przeprowadzone badania potwierdzają słuszość stosowania analiz MES, których wyniki stanowią swoiste sprzężenie zwrotne w fazie konstruowania. Wyniki analiz MES mogą być podstawą do zmiany geometrii konstrukcji, a tym samym doprowadzić do poprawy charakterystyki dynamicznej zanim zostanie wykonany prototyp.

Jako powszechnie stosowana w praktyce technika badań właściwości dynamicznych, analiza modalna pozwala na identyfikację parametrów obiektów mechanicznych, a tym samym umożliwia przewidywanie ich zachowania na skutek zaburzeń równowagi. W przypadku metodyki przedstawionej w artykule, dotyczącej badań stojaka obrabiarki, uzyskano zadowalającą, jak na brak walidacji modelu, zgodność analizy modalnej teoretycznej oraz eksperymentalnej.

Realizowane prace badawcze związane z identyfikacją parametrów dynamicznych elementów obrabiarek są często realizowane jako badania symulacyjne i/lub badania eksperymentalne. Jednak z uwagi na duże koszty wykonania prototypu, ograniczają się zazwyczaj do badań symulacyjnych. W badaniach przedstawionych w niniejszym artykule, dzięki prototypowi przygotowanemu w ramach pracy [6], możliwe było przeprowadzenie tych badań w sposób kompleksowy. Tym samym możliwa stała się ocena jakości modelu numerycznego MES.

LITERATURA

- [1] KOSMOL J., SLIWKA J., KLARECKI K., MIESZCZAK W., 2001, *Identification of static and dynamic properties of axle-turning lathe*, 12th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Precision Engineering" 24-27th October 2001, Jena, Germany.
- [2] ŚLIWKA J., KOSMOL J., KAŹMIERCZAK M., 2005, *Identyfikacja własności statycznych i dynamicznych obrabiarek ciężkich w warunkach przemysłowych*, *Przegląd Mechaniczny*, 5/05, 30-35, ISSN 0033-2259.
- [3] WILK P., 2011, *Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych i metody elementów skończonych w optymalizacji korpusów obrabiarek*, *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn*, Gliwice, 1.
- [4] BANCZAREK K., KOSMOL J., 2012, *Badania rozpoznawcze właściwości statycznych i dynamicznych silnika liniowego*, *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn*, Gliwice, 1.
- [5] KOSMOL J., PATALONG B., 2012, *Badania sztywności statycznej korpusu stojaka centrum frezarskiego FV-2*, *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn*, Gliwice, 1.
- [6] SOKOŁOWSKI A., LIS K., 2009, *Zintegrowany system do badań obrabiarek w warunkach przemysłowych – wybrane tory pomiarowe*. *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn*, Gliwice, 1.
- [7] Dokumentacja konstrukcyjna centrum frezarskiego z przesuwym stojakiem, 2006, CBKO Pruszków.

MODAL ANALYSIS OF COLUMN BODY OF CNC MACHINE TOOL

The paper presents comprehensive approach to identification of mode shapes and natural frequencies of machine tool supporting structure an example of column body of vertical milling center. The presented method includes preliminary simulation research with using Finite Element Method and experimental research. The paper presents the FEM model of body and measuring stand to experimental research. The results of performed research are summary of results and evaluation of discrepancy between the FEM results with respect to the results of experimental research.

Keywords: *vibrations, machine tool, modelling, FEM*