

IDENTYFIKACJA WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH KONSTRUKCJI WSPORCZEJ CZĘŚCI PRASOWEJ MASZYNY PAPIERNICZEJ W WARUNKACH EKSPLOATACYJNYCH

Igor SORDYL, Franciszek SORDYL

VIBROEXPERT, ul. Miastkowska 51, 60-184 Poznań

fax: +48 (61) 868 41 35, e-mail: isordyl@vibroexpert.com.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące identyfikacji własności dynamicznych konstrukcji wsporczej części prasowej maszyny papierniczej poddanej w warunkach eksploatacyjnych działaniu wielu poliharmonicznych wymuszeń dynamicznych. W pierwszej części artykułu omówiono okoliczności wskazujące na możliwość występowania wzmocnień rezonansowych odpowiedzi drganiowych na działające wymuszenia dynamiczne oraz przeanalizowano potrzeby i ograniczenia związane z realizacją identyfikacji własności dynamicznych konstrukcji. Ponadto wykazano, że wiarygodna estymacja własności dynamicznych omawianej konstrukcji wsporczej wymaga zastosowania testu dynamicznego z wykorzystaniem wymuszeń działających podczas normalnej eksploatacji maszyny papierniczej.

Wyniki rozważań przeprowadzonych w pierwszej części artykułu były podstawą realizacji badań własności dynamicznych konstrukcji wsporczej części prasowej maszyny papierniczej w warunkach eksploatacyjnych. Analiza wyników badań własności dynamicznych tej konstrukcji została przedstawiona w drugiej części artykułu. Dla uzyskanych przebiegów odpowiedzi drganiowych wyznaczono charakterystyki teoretyczne i dopasowano je do tych przebiegów uzyskując w ten sposób parametry dynamiczne badanej konstrukcji. Wyniki badań własności dynamicznych porównano następnie z wynikami obliczeń dynamicznych charakterystyk amplitudowych w oparciu o metodę elementów skończonych i na tej podstawie podjęto decyzję o realizacji modernizacji konstrukcji.

Słowa kluczowe: własności dynamiczne, badania dynamiczne, maszyna papiernicza.

IDENTIFICATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF THE PAPER MACHINE PRESS PART SUPPORT STRUCTURE IN OPERATION CONDITIONS

Summary

The paper presents identification of dynamic properties of a paper machine press part support structure subjected to many polyharmonic excitations during operation. First part of the article contains description of circumstances pointing at possibility of resonant amplification of vibration responses to the dynamic excitations and analysis of needs and limitations connected with identification of the structure dynamic properties. Moreover it was pointed out that in order to realize reliable estimation of the support structure dynamic properties one should apply dynamic test using excitations acting during standard operation of the paper machine.

Results of considerations presented in first part of the article were the base to conduct the research of paper machine press part support structure dynamic properties in operation conditions. Analysis of research results of dynamic properties of this structure is presented in second part of the article. Theoretic characteristics were estimated for courses of vibration responses and matched to these courses in order to estimate dynamic parameters of the considered structure. Next, research results of structure dynamic properties and results of dynamic calculations realized on the base of finite element method were compared and decision concerning realization of the support structure modernization was made.

Keywords: dynamic properties, dynamic test, paper machine.

1. WSTĘP

W napędach wielu maszyn stosowane są przekształtniki częstotliwości umożliwiające eksploatację maszyn w założonym zakresie prędkości. Stawia to szczególne wymagania dotyczące własności dynamicznych konstrukcji.

Własności te powinny być ukształtowane w taki sposób, by w założonym zakresie prędkości nie występowały wzmocnienia rezonansowe odpowiedzi drganiowej na możliwe wymuszenia dynamiczne, jeżeli nie są one pożądane ze względu na realizowany proces technologiczny.

Podczas analiz dynamicznych w fazie projektowania należałoby uwzględnić możliwość występowania zarówno wymuszeń o częstotliwościach podstawowych wynikających z ruchu poszczególnych podzespołów maszyn jak i o częstotliwościach będących krotnościami tych częstotliwości podstawowych. Doświadczenia Autorów artykułu wskazują, że nie zawsze ma to miejsce. Wystąpienie niepożądanych wzmocnień rezonansowych odpowiedzi drganiowej na nieuwzględnione w obliczeniach wymuszenia dynamiczne może doprowadzić do narażenia konstrukcji maszyny na znaczne i niebezpieczne obciążenia dynamiczne. W wyniku działania tych obciążeń trwałość poszczególnych podzespołów może zostać istotnie obniżona [5].

W przypadku, gdy zachodzi podejrzenie, że w założonym zakresie prędkości maszyny występują wzmocnienia rezonansowe odpowiedzi drganiowej na działające wymuszenia dynamiczne, można rozwiązać problem na dwa sposoby [7].

Pierwszy sposób polega na opracowaniu zaleceń eksploatacyjnych zmierzających do wyłączenia z założonego zakresu prędkości maszyny zakresów prędkości, w których możliwe jest wystąpienie wzmocnień rezonansowych. Ten sposób rozwiązania problemu jest stosunkowo tani, ale wystarczający tylko wtedy, gdy wyłączenie wyznaczonych zakresów prędkości z eksploatacji jest akceptowane przez użytkownika maszyny.

Drugim sposobem rozwiązania problemu jest modyfikacja konstrukcji na podstawie wyników estymacji jej własności dynamicznych. Ten sposób rozwiązania problemu pozwala na eksploatację maszyny w pełnym założonym zakresie prędkości.

W wielu zakładach przemysłowych znaczny nacisk kładzie się na wzrost prędkości lub zwiększanie założonego zakresu prędkości pracy maszyn w celu zwiększania możliwości technologicznych i wydajności produkcji. Wiąże się to z koniecznością przeprowadzenia modernizacji parku maszynowego. Zakres modernizacji może obejmować:

- wymianę maszyn (napędów) oraz zmiany własności dynamicznych konstrukcji wsporczej,
- zmiany konstrukcyjne podzespołów, np. wymianę napędów na nowe, zapewniające pożądane zakresy prędkości – w przypadku dużych agregatów.

W drugim przypadku, po przeprowadzeniu modernizacji, istnieje duże prawdopodobieństwo, że w nowych, rozszerzonych zakresach prędkości maszyn mogą pojawić się wzmocnienia rezonansowe odpowiedzi drganiowej przy określonych prędkościach, będących poprzednio poza konstrukcyjnym zakresem prędkości maszyny. Wtedy konieczne byłoby albo wyłączenie z nowego zakresu prędkości eksploatacyjnych maszyny tych zakresów prędkości, w których występują wzmocnienia rezonansowe odpowiedzi drganiowej albo rozszerzenie modernizacji w celu zapewnienia

koniecznych zmian własności dynamicznych konstrukcji.

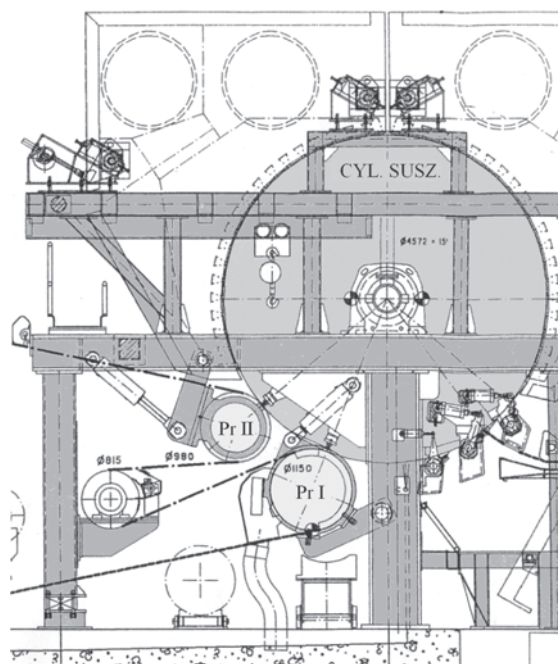
2. ANALIZA POTRZEB IDENTYFIKACJI WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH KONSTRUKCJI CZĘŚCI PRASOWEJ MASZYNY PAPIERNICZEJ

2.1. Część prasowa maszyny papierniczej

Na Rys. 1 przedstawiono schemat konstrukcyjny części prasowej maszyny papierniczej typu tissue, przeznaczonej do produkcji półsurowca wykorzystywanego do produkcji m. in. papieru toaletowego, ręczników papierowych, chusteczek higienicznych, itp.

Część prasowa zawiera następujące podstawowe podzespoły zamocowane do ramy ustawionej na fundamencie (patrz opis podzespołów na Rys. 1):

- **cylinder suszący** przeznaczony do suszenia wstęgi papieru,
- wał lub wały prasowe przeznaczone do odwadniania mokrej wstęgi papieru:
 - **wał prasowy I** (ssący) – o złożonej konstrukcji wewnętrznej (skrzynia ssąca) – **Pr I**,
 - w niektórych przypadkach stosowany jest dodatkowy **wał prasowy II** – **Pr II**.



Rys. 1. Część prasowa maszyny papierniczej

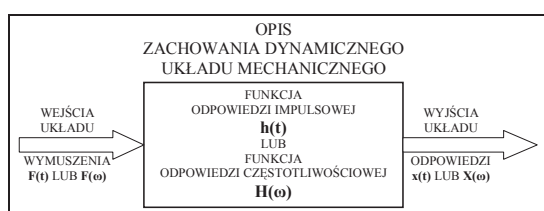
Wały prasowe i cylinder napędzane są własnymi układami napędowymi sterowanymi za pomocą układu automatycznej regulacji. Obudowy łożysk wałów prasowych mocowane są na ramionach hydraulicznych lub pneumatycznych systemów docisku wałów do cylindra suszącego.

Istotną cechą konstrukcji nośnych maszyn papierniczych jest przystosowanie ich do wymiany

odzieży maszynowej. Demontaż i niedokładny montaż elementów pośrednich może czasami spowodować istotną zmianę własności dynamicznych układu.

2.2. Wpływ własności dynamicznych układu na wartości odpowiedzi drganiowych na działające wymuszenia dynamiczne

Na Rys. 2 przedstawiony został schemat wyznaczania własności dynamicznych układu mechanicznego poprzez rozwiązanie zagadnienia „czarnej skrzynki”. W takim przypadku istnieje konieczność realizacji pomiaru wejść układu mechanicznego, czyli wymuszeń działających na układ oraz wyjść układu, czyli odpowiedzi układu na działające wymuszenia.



Rys. 2. Wyznaczanie własności dynamicznych układu mechanicznego poprzez rozwiązanie zagadnienia „czarnej skrzynki”

Na podstawie zmierzonych sygnałów wymuszeń oraz odpowiedzi układu wyznacza się charakterystyki czasowe (*funkcje odpowiedzi impulsowej $h(t)$*) lub częstotliwościowe (*funkcje odpowiedzi częstotliwościowej $H(\omega)$*) tworzące **model dynamiczny** układu. Wyznaczenie tych funkcji prowadzi do uzyskania pełnego opisu zachowania dynamicznego układu mechanicznego.

Poniżej przedstawiona została zależność wartości odpowiedzi drganiowej na działające wymuszenia od wartości wymuszeń oraz od własności dynamicznych konstrukcji – przy założeniu, że aproksymacja liniowa badanej konstrukcji jest wystarczająco dokładna:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n h_{ij}(t) \circ F_j(t) \quad \xrightarrow{\text{PRZEKSZT. FOURIERA}} \quad X_i(\omega) = \sum_{j=1}^n H_{ij}(\omega) F_j(\omega)$$

gdzie:

$x_i(t)$ – wartość odpowiedzi drganiowej w punkcie i ($i = 1, 2, \dots, n$),

$F_j(t)$ – j -ta składowa wektora wymuszeń,

$h_{ij}(t)$ – funkcja odpowiedzi impulsowej w punkcie j na wymuszenie w punkcie i .

oraz:

$X_i(\omega)$ – przekształ. Fouriera odpowiedzi drganiowej w punkcie i ,

$F_j(\omega)$ – przekształ. Fouriera j -tej składowej wektora wymuszeń,

$H_{ij}(\omega)$ – funkcja odpowiedzi częstotliwościowej w punkcie j na wymuszenie w punkcie i .

Z powyższego wzoru wynika m. in., że niski poziom drgań mierzonych na obudowach łożysk lub

korpusach podzespołów nie zawsze świadczy o niskim poziomie wymuszeń dynamicznych działających na podzespoły i konstrukcję maszyny. Jeżeli podatność konstrukcji między miejscem oddziaływania wymuszeń dynamicznych i punktami obserwacji odpowiedzi drganiowej jest mała, to w punktach pomiarowych może być obserwowany niski poziom drgań, mimo wysokiego poziomu działających wymuszeń. W przypadku omawianej konstrukcji wsporczej części prasowej taka sytuacja ma miejsce w przypadku **wał prasowego I**. Na obudowach łożysk **wał prasowego II** zazwyczaj mierzony jest dużo wyższy poziom drgań niż na obudowach łożysk **wał prasowego I**, głównie ze względu na większą podatność konstrukcji w miejscu mocowania tego wału.

2.3. Konsekwencje niewłaściwego doboru własności dynamicznych konstrukcji wsporczych maszyn papierniczych

Maszyny papiernicze są złożonymi konstrukcjami mechanicznymi, na które działa wiele wymuszeń dynamicznych. Prędkości obrotowe niektórych wałów współczesnych maszyn papierniczych sięgają 1000 obr/min. W związku z tym konsekwencje wynikające z eksploatacji maszyn papierniczych o niewłaściwie dobranych własnościach dynamicznych są znacznie poważniejsze niż w przeszłości, gdy wały maszyn papierniczych pracowały z niewielkimi prędkościami obrotowymi i były osadzone w ramach o dużej sztywności dynamicznej dla stosowanych zakresów prędkości.

Konieczność identyfikacji własności dynamicznych maszyn podczas ich eksploatacji pojawiła się po pewnym okresie realizacji zadań diagnostyki technicznej maszyn papierniczych, zarówno modernizowanych, jak i nowych. Wynika to z faktu, że potrzeba prowadzenia analizy stanu dynamicznego jest w wielu przypadkach niedoceniana bądź niezrozumiana przez inwestorów oraz wykonawców modernizacji i producentów maszyn.

Podejrzenie, że w założonym zakresie prędkości mogą występować wzmocnienia rezonansowe odpowiedzi drganiowej na działające wymuszenia dynamiczne wynikało z analizy wyników obserwacji diagnostycznej zrealizowanych w kilku kolejnych sesjach pomiarowych. Na przykład, podczas pomiarów drgań obudów łożysk wałów sekcji prasowych maszyn papierniczych przy jednej prędkości maszyny obserwowano bardzo wysoką wartość jednej ze składowych harmonicznych odpowiedzi drganiowej, a przy mniejszej i większej prędkości wartość tej składowej była znacznie mniejsza [7].

Kolejnym sygnałem wskazującym na możliwość występowania wzmocnień rezonansowych odpowiedzi drganiowej na wymuszenia dynamiczne był fakt, że nawet dokładniejsze, niż określone przez producenta maszyny, wyważenie wałów nie

prowadziło do oczekiwanego obniżenia wpływu oddziaływań tego niewyważenia na poziom drgań.

Możliwość występowania wzmocnień rezonansowych odpowiedzi drganiowej na działające wymuszenia dynamiczne świadczyła o znacznym prawdopodobieństwie niewłaściwego doboru własności dynamicznych konstrukcji. Zjawiska świadczące o możliwości występowania wzmocnień rezonansowych obserwowane były również podczas pomiarów drgań obudów łożysk wałów innych części maszyn papierniczych (p. np. [5] i [6]) a także podczas pomiarów drgań obudów łożysk i korpusów maszyn pomocniczych, np. pomp próżniowych i wentylatorów. Jednak w dotychczasowej praktyce przemysłowej Autorów artykułu najpoważniejsze problemy związane były z niewłaściwie dobranymi własnościami dynamicznymi konstrukcji wsporczych części prasowych (i ich zespołów napędowych) różnych maszyn papierniczych.

2.4. Cel identyfikacji własności dynamicznych konstrukcji wsporczych maszyn papierniczych

Własności dynamiczne konstrukcji mechanicznych są jednym z podstawowych czynników określających wytrzymałość zmęczeniową i w konsekwencji trwałość i niezawodność konstrukcji. Na etapie projektowania oraz podczas eksploatacji konstrukcji wsporczych części prasowych maszyn papierniczych, często pojawiają się uzasadnione podejrzenia¹⁾, że w założonym zakresie prędkości lub przy założonej stałej prędkości mogą występować istotne wzmocnienia rezonansowe odpowiedzi drganiowej na działające wymuszenia dynamiczne. W celu weryfikacji występowania wzmocnień rezonansowych odpowiedzi drganiowej na działające wymuszenia dynamiczne i zaproponowania odpowiednich działań zmierzających do rozwiązania problemu należy przeprowadzić:

- analizę własności dynamicznych na etapie projektowania tych konstrukcji, w oparciu o analizę zachowań modelu konstrukcji,
- identyfikację charakterystyk dynamicznych konstrukcji w fazie prototypu (jeżeli jest to możliwe),
- **estymację i monitorowanie własności dynamicznych obiektu rzeczywistego w warunkach eksploatacyjnych.**

Po realizacji identyfikacji (estymacji) własności dynamicznych uzyskuje się odpowiedź na pytanie, czy są one właściwie dobrane. W przypadku, gdy odpowiedź jest negatywna, możliwe jest sformułowanie zaleceń zmian konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, które spowodują taką zmianę zachowań dynamicznych, by w określonym zakresie prędkości nie wystąpiły niepożądane zjawiska

rezonansowe. W rezultacie ograniczone zostanie występowanie niebezpiecznych obciążeń dynamicznych, co zapewni bardziej efektywną eksploatację maszyn.

Do rozwiązania powyższych zadań opracowano metodę estymacji własności dynamicznych konstrukcji [7], dzięki której możliwe było:

- wyznaczenie niebezpiecznych zakresów prędkości oraz estymacja współczynników wzmocnień odpowiedzi drganiowych mierzonych w punktach pomiarowych konstrukcji poddawanej podczas eksploatacji działaniu wielu wymuszeń poliharmonicznych,
- sformułowanie zaleceń dotyczących koniecznych zmian własności dynamicznych w celu możliwości eksploatacji maszyny w założonym zakresie prędkości,
- sformułowanie zaleceń dotyczących eksploatacji maszyny z prędkościami będącymi poza zakresami, w których możliwe było wystąpienie wzmocnień rezonansowych; zalecenia te powinny być realizowane docelowo lub do czasu przeprowadzenia modernizacji konstrukcji prowadzącej do zmiany jej własności dynamicznych.

Metoda estymacji własności dynamicznych złożonych konstrukcji mechanicznych w warunkach eksploatacyjnych jest obecnie uzupełniana oraz rozszerzana. Ponadto podjęto prace dotyczące rozbudowy podstaw teoretycznych opracowanej metody.

Jak wspomniano wcześniej, na zachowanie dynamiczne podzespołów maszyn mają wpływ działające wymuszenia oraz własności dynamiczne konstrukcji. Obraz zachowania dynamicznego podzespołów, jako odpowiedzi drganiowej na działające wymuszenia, uzyskuje się w wyniku pomiarów drgań obudów łożysk. Punkty pomiarowe dobierane są indywidualnie dla każdego podzespołu. Kryterium doboru punktów pomiarowych stanowią m. in. realizowane zadania diagnostyki technicznej²⁾.

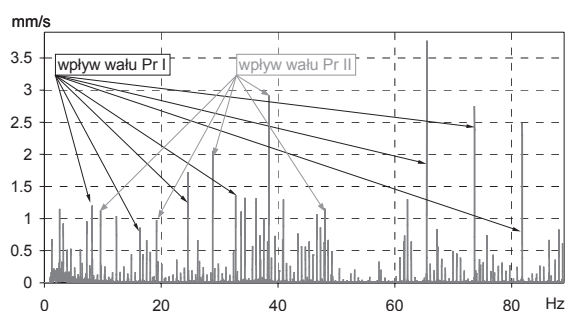
W każdym punkcie pomiarowym uzyskany obraz zachowania dynamicznego może być inny ze względu na różną podatność konstrukcji na działające wymuszenia w miejscach mocowania obudów łożysk podzespołów oraz różną drogę i różne tłumienie wymuszeń przez konstrukcję maszyny. Bez przeprowadzenia identyfikacji własności dynamicznych konstrukcji nie jest możliwe określenie rzeczywistych wartości działających wymuszeń.

¹⁾ Podejrzenia te są tym bardziej uzasadnione, im większe są założone prędkości podzespołów lub maszyn zamocowanych do konstrukcji

²⁾ W przypadku omawianej części prasowej czujniki drgań mierzące sygnały drganiowe na obudowach łożysk wałów prasowych w kierunku poprzecznym ustawiane są wzdłuż linii docisku **wału prasowego I** i **wału prasowego II** do cylindra suszącego.

2.5. Źródła wymuszeń dynamicznych działających na konstrukcję części prasowej

Na Rys. 3 przedstawiony jest przykładowy wynik analizy widmowej prędkości drgań obudowy łożyska **wału prasowego II** (Pr II – patrz Rys. 1). Widoczne są tu szeregi składowych harmonicznych ilustrujących odpowiedź drganiową na wymuszenia wynikające z oddziaływań **wału prasowego I** oraz **wału prasowego II**. Ponadto widoczny jest szereg składowych harmonicznych ilustrujących oddziaływanie filcu przechodzącego pomiędzy wałami prasowymi i cylindrem, przenoszone poprzez konstrukcję wsporczą maszyny na obudowy łożysk wałów.



Rys. 3: Widmo amplitudowe prędkości drgań obudowy łożyska **wału prasowego II**

Podzespoły zamocowane do konstrukcji wsporczej części prasowej maszyny papierniczej oraz odzież maszynowa pracują z różnymi prędkościami obrotowymi. Każdy z podzespołów podczas pracy generuje poliharmoniczne wymuszenia dynamiczne o różnych częstotliwościach podstawowych.

Tabela 1 przedstawia zestawienie najistotniejszych źródeł wymuszeń zidentyfikowanych podczas badań własności dynamicznych konstrukcji oraz składowych harmonicznych prędkości drgań ilustrujących oddziaływanie poszczególnych wymuszeń w wynikach analiz widmowych.

Tabela 1: Najistotniejsze źródła wymuszeń dynamicznych wałów prasowych oraz składowe harmoniczne ilustrujące oddziaływanie wymuszeń

Źródło wymuszenia	Krotności			
	częstotliwości obrotów wałów lub częstotliwości obiegu filcu			
	1	2-3	4-12	12-...
Niewyważenie wałów	X	---	---	---
Niewspółosiowość czopów	X	X	---	---
Wady powierzchni wałów	X	X	X	---
Oddziaływania filcu	X	X	X	X

Wymuszenia wynikające z niewspółosiowości czopów oraz z wad powierzchni wałów prasowych, działające na część prasową maszyny papierniczej, są ilustrowane w widmach amplitudowych drgań

również przez harmoniczne o częstotliwościach podstawowych. Ponadto mają one istotny wpływ na wartości odpowiedzi drganiowych na wymuszenia o częstotliwościach podstawowych. Konsekwencje wynikające z tego faktu zostaną przedstawione w rozdziale 3.

Występowanie wielu wymuszeń poliharmonicznych o małych różnicach między ich częstotliwościami podstawowymi jest istotnym problemem, który należy wziąć pod uwagę podczas identyfikacji własności dynamicznych w warunkach eksploatacyjnych. Powoduje to, że estymacja własności dynamicznych konstrukcji części prasowych maszyn papierniczych jest zagadnieniem trudnym i wymagającym zastosowania analiz widmowych o bardzo dużej rozdzielczości.

W przypadku bardzo dobrego stanu technicznego wałów, cylindra i filcu wymuszenia mogą mieć małe wartości, co wpływa na wartości błędów pomiarowych podczas identyfikacji własności dynamicznych. Jest to kolejny istotny problem, który należy wziąć pod uwagę podczas identyfikacji w warunkach eksploatacyjnych.

3. OGRANICZENIA ZWIĄZANE Z IDENTYFIKACJĄ WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH CZĘŚCI PRASOWEJ MASZYNY PAPIERNICZEJ W WARUNKACH EKSPLOATACYJNYCH

Realizacja wiarygodnej estymacji własności dynamicznych konstrukcji mechanicznej wymaga wyznaczenia charakterystyk amplitudowych oraz charakterystyk fazowych na podstawie analizy odpowiedzi drganiowej na działające wymuszenia dynamiczne.

Następnie na podstawie wyznaczonych charakterystyk amplitudowych i fazowych estymuje się charakterystyki teoretyczne, dobierając częstotliwości drgań własnych oraz stopnie tłumienia np. z wykorzystaniem algorytmu **curve fitting** [2, s. 153-195]. Po estymacji częstotliwości drgań własnych oraz stopni tłumienia estymuje się postacie drgań własnych badanej konstrukcji.

Z przeprowadzonej dotychczas analizy stanu wiedzy wynika, że podstawą opracowanych dotychczas metod estymacji własności dynamicznych konstrukcji mechanicznych w warunkach eksploatacyjnych (tzw. Eksploatacyjna Analiza Modalna) jest założenie, że wymuszenie działające na badaną konstrukcję ma charakter białego szumu [3]. Opracowano modyfikacje części z tych metod uwzględniające dodatkowe oddziaływanie wymuszeń harmonicznych [4]. Jednak zastosowanie tych metod do estymacji własności dynamicznych złożonych konstrukcji mechanicznych nie jest możliwe w przypadku, gdy wymuszenia działające na rozważaną konstrukcję są okresowe.

Podczas eksploatacji na konstrukcję części prasowej maszyny papierniczej działają wymuszenia

okresowe, będące sumą wielu składowych harmonicznym o istotnym udziale energetycznym:

$$F_i(t) = \sum_{k=1}^n F_{ik} \sin(2\pi k f_{0i} t + \varphi_k)$$

gdzie:

$F_i(t)$ – wymuszenie okresowe o okresie $T_{0i} = 1/f_{0i}$,

F_{ik} – amplituda wymuszenia harmonicznego o częstotliwości kf_{0i} ,

φ_k – początkowy kąt fazowy składowej harmonicznnej nr k.

W przypadku, gdy przynajmniej jedna z częstotliwości f_{0i} jest liczbą niewymierną, to suma wymuszeń okresowych $F_i(t)$ nie jest wymuszeniem okresowym. W takim przypadku postać drgań wymuszonych jest nieokresową funkcją czasu. Możliwe jest wtedy wyznaczenie jedynie chwilowych (niepowtarzalnych) postaci drgań wymuszonych.

W związku z tym, estymacja parametrów dynamicznych w warunkach eksploatacji z wieloma stacjonarnymi wymuszeniami okresowymi nie jest możliwa za pomocą znanych metod Eksploatacyjnej Analizy Modalnej. W przypadku badań własności dynamicznych konstrukcji wspaniejszej części prasowej maszyny papierniczej wykorzystany został fakt, że maszyna papiernicza pracuje ze stałą prędkością wybraną (ze względów technologicznych) z pewnego zakresu prędkości. Okazało się, że dla celów identyfikacji własności dynamicznych możliwe było przeprowadzenie pomiarów dla różnych prędkości z zakresu prędkości maszyny papierniczej.

Podczas badań własności dynamicznych złożonej konstrukcji mechanicznej w warunkach eksploatacyjnych nie ma możliwości pomiaru wymuszeń dynamicznych działających na konstrukcję (stanowiących wejścia układu mechanicznego). Wyznaczenie ruchu punktów pomiarowych odpowiadających kolejnym postaciom drgań własnych jest bardzo trudne, a w większości przypadków niemożliwe, ze względu na:

- brak możliwości pomiarów kątów fazowych między odpowiednimi składowymi wymuszenia i odpowiedzi dla składowych harmonicznym o częstotliwościach będących krotnościami częstotliwości podstawowej,
- niejednoznaczność pomiarów kątów fazowych dla składowych harmonicznym o częstotliwościach podstawowych.

W takim przypadku estymacja własności dynamicznych musi ograniczać się do estymacji **częstotliwości drgań własnych** oraz **tłumienia drgań własnych** konstrukcji mechanicznej z wykorzystaniem pomiarów odpowiedzi drganiowej podczas pracy maszyny z różnymi prędkościami (stałymi podczas pomiaru), w wybranych punktach pomiarowych (stanowiących wyjścia układu mechanicznego).

Estymacja parametrów dynamicznych jest realizowana w oparciu o dyskretne charakterystyki

drganiowe przedstawiające wartości określonych składowych harmonicznym w funkcji częstotliwości. Błąd estymacji wartości **częstotliwości drgań własnych** oraz **tłumienia drgań własnych** uwarunkowany jest wzajemnym wpływem poszczególnych postaci drgań własnych, np. możliwości wymuszenia kilku postaci drgań własnych przez jedno wymuszenie harmoniczne. Może to mieć miejsce np. w przypadku małej różnicy między wartościami częstotliwości drgań własnych [1].

4. MOŻLIWOŚĆ STOSOWANIA TESTÓW DYNAMICZNYCH DLA CZĘŚCI PRASOWYCH MASZYN PAPIERNICZYCH

Estymacja własności dynamicznych konstrukcji mechanicznych wymaga zastosowania **testu dynamicznego**, który polega na poddaniu układu wymuszeniu w określonym zakresie częstotliwości i badaniu odpowiedzi drganiowej tego układu. W testach dynamicznych stosowane są różne wymuszenia [2, s. 94-104], [8, s. 86-94]:

- wymuszenia zewnętrzne (zwykle z pomiarem sił wymuszających), np.:
 - wymuszenie harmoniczne o stałej amplitudzie i wolno zmieniającej się częstotliwości w założonym zakresie częstotliwości,
 - wymuszenie szerokopasmowe,
 - wymuszenie impulsowe z określonym sposobem wymuszenia w celu zapewnienia wiarygodnych wyników w założonym zakresie częstotliwości,
- wymuszenie siłami działającymi podczas eksploatacji [9, s. 1-4] lub podczas rozbiegu/wybiegu maszyny (w tym przypadku brak jest możliwości pomiaru sił wymuszających drgania układu).

Testy dynamiczne z zastosowaniem wymuszeń zewnętrznych muszą być realizowane podczas postoju maszyny.

W przypadku części prasowych maszyn papierniczych podczas zatrzymywania oraz postoju wały prasowe muszą być odstawione od siebie, lub od cylindra suszącego (w przypadku maszyn typu tissue) m.in. ze względu na możliwość powstania odkształceń na ich powierzchniach. Próba przeprowadzenia identyfikacji własności dynamicznych części prasowej maszyny papierniczej podczas postoju wykazała, że na postać odpowiedzi drganiowych duży wpływ miały oddziaływania wynikające z luzów w mocowaniach wałów prasowych. Oddziaływania wynikające z luzów nie były obserwowane podczas testów realizowanych w warunkach eksploatacyjnych. Ten fakt jest kolejnym dowodem na to, że badana konstrukcja ma podczas postoju inne własności dynamiczne niż podczas eksploatacji. W przypadku badań własności dynamicznych konstrukcji podczas postoju maszyny

papierniczej nie jest możliwe uzyskanie konfiguracji układu odpowiadającej warunkom eksploatacyjnym:

- docisków wałów prasowych do cylindra suszącego,
- wartości temperatury i ciśnienia wewnątrz cylindra warunkujących układ i reakcje więzów wpływających na własności dynamiczne.

Zachowanie dynamiczne podzespołów części prasowej maszyny papierniczej podczas eksploatacji zależy od stosowanych parametrów pracy, m.in.: wartości docisków wałów prasowych, stanu filcu, jakości powierzchni wałów i cylindra, wartości i rozkładu temperatur.

Są to istotne cechy części prasowych maszyn papierniczych, które powodują, że własności dynamiczne tych konstrukcji podczas postoju odbiegają od własności dynamicznych podczas eksploatacji maszyny papierniczej. W takim przypadku realizacja testu dynamicznego z zastosowaniem wymuszenia zewnętrznego, podczas postoju maszyny, prowadzi do identyfikacji własności dynamicznych innego układu mechanicznego niż w przypadku zastosowania wymuszeń siłami działającymi podczas eksploatacji. Informacje o własnościach dynamicznych konstrukcji wsporczej części prasowych maszyn papierniczych, wyznaczone podczas postoju, nie będą informacjami użytecznymi z punktu widzenia użytkowników maszyn papierniczych. Uzyskanie wiarygodnych informacji o zachowaniu dynamicznym części prasowych maszyn papierniczych podczas eksploatacji wymaga zatem realizacji testu dynamicznego z zastosowaniem wymuszeń siłami działającymi podczas eksploatacji.

5. ESTYMACJA WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH

5.1. Badania własności dynamicznych

W oparciu o rozważania przedstawione w rozdziale 3, przeprowadzone zostały badania własności dynamicznych konstrukcji części prasowej maszyny papierniczej.

Tabela 2 przedstawia warunki realizacji poszczególnych badań.

Tabela 2. Warunki realizacji badań własności dynamicznych konstrukcji.

Nr	Zakres prędkości [m/min]	Krok [m/min]	Wał prasowy I	Wał prasowy II
PRZED MODERNIZACJĄ KONSTRUKCJI				
1	1300-1800	20	Pr I A	Pr II B
2	1600-1800	10	Pr I B	Pr II B
3	1200-1800	8	Pr I A	Pr II A
PO MODERNIZACJI KONSTRUKCJI				
4	1352-1800	8	Pr I B	Pr II B

Podczas badań mierzono odpowiedzi drganiowe na eksploatacyjne wymuszenia dynamiczne

w punktach pomiarowych zlokalizowanych na obudowach łożysk:

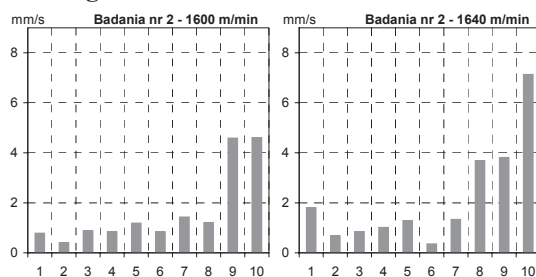
- **wału prasowego I** oraz **wału prasowego II** – w kierunku poprzecznym, wzdłuż linii działania siły docisku danego wału do **cylindra suszącego**,
- **cylindra suszącego** – w kierunku poziomym.

Badania własności dynamicznych zostały przeprowadzone czterokrotnie: trzy razy przed modernizacją i czwarty raz po modernizacji konstrukcji wsporczej.

Wały prasowe poddawane są co kilka miesięcy czynnościom naprawczym. W zakres tych czynności może wchodzić m. in. wymiana płaszcz gumowego, wyważanie wału i szlifowanie powierzchni gumowej powłoki. W tym czasie maszyna papiernicza pracuje z drugim kompletem wałów prasowych. Dla potrzeb artykułu będą one oznaczone **Pr I A**, **Pr I B**, **Pr II A** i **Pr II B**.

5.2. Analiza przebiegów składowych harmonicznych

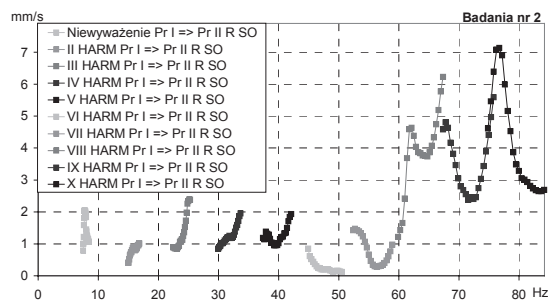
W celu realizacji estymacji własności dynamicznych konstrukcji części prasowej maszyny papierniczej wyznaczono wartości kolejnych składowych harmonicznych o częstotliwościach podstawowych równych częstotliwościom obrotów **wału prasowego I** oraz **wału prasowego II** w zakresie częstotliwości do **150 Hz**. W tym zakresie energia drgań stanowiła ok. **90 %** energii drganiowej w zakresie częstotliwości, w którym przeprowadzane były pomiary (**0.3-1000 Hz**). Wyznaczone szeregi składowych harmonicznych stanowiły drganiowe obrazy wpływu oddziaływań **wałów prasowych** na poziom drgań obudów łożysk **wałów prasowych** oraz **cylindra suszącego**. Składowe harmoniczne zostały wyznaczone dla wyników pomiarów przy każdej ustawionej prędkości z zakresu prędkości ustalonego podczas poszczególnych badań własności dynamicznych. Rys. 4 przedstawia przykładowe obrazy drganiowe ilustrujące wpływ oddziaływań **wału prasowego I** obserwowany na obudowie łożyska **wału prasowego II** przy prędkościach maszyny papierniczej ustawionej na **1600 m/min** i **1640 m/min**. Obrazy te zostały uzyskane poprzez zastosowanie filtra grzebieniowego z częstotliwością podstawową równą częstotliwości obrotów **wału prasowego I**.



Rys. 4: Obrazy drganiowe oddziaływań **wału prasowego I** obserwowane na obudowie łożyska **wału prasowego II**

W celu przeprowadzenia analizy zależności wpływu oddziaływań wałów prasowych od własności dynamicznych konstrukcji wsporczej części prasowej maszyny papierniczej, zmiany wartości poszczególnych składowych harmonicznym przedstawione zostały w funkcji ich częstotliwości.

Rys. 5 przedstawia przykładowe przebiegi wartości kolejnych składowych harmonicznym o podstawowej częstotliwości równej częstotliwości obrotów **wału prasowego I**.



Rys. 5: Przebiegi wartości kolejnych składowych harmonicznym obrotów **wału prasowego I**

Na wykresie przedstawiony został drganiowy obraz wpływu oddziaływań **wału prasowego I** na poziom drgań poprzecznych obudowy łożyska po stronie obsługi **wału prasowego II**, uzyskany na podstawie wyników badań **nr 2**. Każdy przebieg odpowiada w tym przypadku zmianom prędkości maszyny w zakresie **1600 ÷ 1800 m/min**. Istotne jest, że w pewnych zakresach częstotliwości nie występowały wymuszenia wynikające z tych oddziaływań.

W kolejnych podrozdziałach zostanie przedstawiona analiza przebiegów wartości obrazów drganiowych oraz wyników estymacji własności dynamicznych dla najistotniejszych wymuszeń zidentyfikowanych podczas badań własności dynamicznych.

5.3. Estymacja charakterystyk dynamicznych

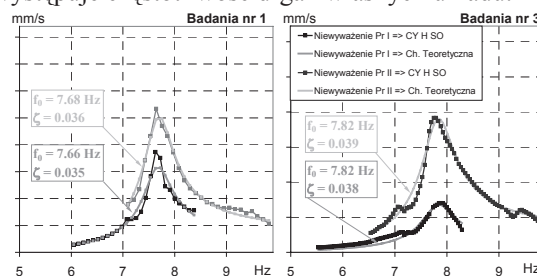
5.3.1 Odpowiedzi drganiowe na wymuszenia wynikające z niewyważenia wałów prasowych

Największe wartości wpływu niewyważenia wałów prasowych na poziom drgań obserwowano na obudowach łożysk cylindra suszącego, natomiast najmniejsze – na obudowach łożysk **wału prasowego I**. Odnotowanie mniejszych wartości na obudowach łożysk wałów prasowych wynika z faktu, że podatność konstrukcji na wymuszenia wynikające z niewyważenia wałów była mniejsza w miejscach mocowania obudów łożysk wałów prasowych, niż w miejscach mocowania obudów łożysk cylindra suszącego. Najmniejszą podatność konstrukcji zaobserwowano w miejscach mocowania obudów łożysk **wału prasowego I**.

Rys. 6 przedstawia porównanie przykładowych przebiegów odpowiedzi drganiowych, na

wymuszenia wynikające z niewyważenia wałów prasowych, w funkcji częstotliwości.

Przebiegi odpowiedzi drganiowych na wymuszenia wynikające z niewyważenia wałów prasowych mają postać zbliżoną do charakterystyk amplitudowych układu mechanicznego – w tym przypadku konstrukcji wsporczej części prasowej maszyny papierniczej. Przebiegi te mają część wspólną. W tym zakresie najprawdopodobniej występuje częstotliwość drgań własnych układu.



Rys. 6. Porównanie przebiegów odpowiedzi drganiowych na wymuszenia wynikające z niewyważenia wałów prasowych

Na Rys. 6 przedstawiono również estymowane charakterystyki teoretyczne, które zostały wyznaczone z zastosowaniem algorytmu dopasowywania ich do przebiegów zmierzonych odpowiedzi drganiowych na wymuszenia wynikające z niewyważenia wałów prasowych. Charakterystyki teoretyczne zostały wyznaczone z założeniem, że estymowane fragmenty przebiegów odpowiedzi drganiowych można z wystarczającą dokładnością przybliżyć przez odpowiedź układu mechanicznego o jednym stopniu swobody na wymuszenie wynikające z niewyważenia (tzn. zależne od kwadratu prędkości obrotowej).

Na wykresach zaznaczono również wartości parametrów dynamicznych oszacowanych na podstawie charakterystyk teoretycznych wyznaczonych dla przebiegów odpowiedzi drganiowych na wymuszenia wynikające z niewyważenia wałów prasowych.

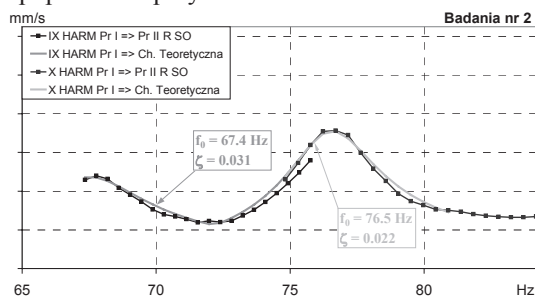
Wyznaczony stopień wzmocnienia drgań zawierał się w analizowanym przypadku w zakresie **12.8-14.3**. Oznaczało to, że w warunkach rezonansowego wzmocnienia wymuszeń wynikających z niewyważenia wałów prasowych występowało kilkunastokrotne wzmocnienie drgań.

5.3.2 Odpowiedzi drganiowe na wymuszenia wynikające z wad powierzchni wałów prasowych

Rys. 7 przedstawia przykładowe przebiegi odpowiedzi drganiowych, na wymuszenia o częstotliwościach równych dziewiętej i dziesiątej krotności częstotliwości obrotów **wału prasowego I**, w funkcji częstotliwości. Wymuszenia te wynikają z wad powierzchni **wału prasowego I**. Odpowiedzi drganiowe zostały w tym przypadku zmierzone

podczas badań nr 2 na obudowie łożyska wału prasowego II.

Na wykresach zaznaczono wartości parametrów dynamicznych oszacowanych na podstawie charakterystyk teoretycznych wyznaczonych dla przebiegów odpowiedzi drganiowych na wymuszenia wynikające z wad powierzchni wału prasowego I, przyjmując te same założenia, co w poprzednim przykładzie.



Rys. 7. Przebiegi odpowiedzi drganiowych na wymuszenia wynikające z wad powierzchni wałów prasowych

5.4. Porównanie wyników badań własności dynamicznych oraz wyników obliczeń dynamicznych w oparciu o metodę elementów skończonych

Tabela 3 zawiera zestawienie jedenastu częstotliwości drgań własnych, które zostały zidentyfikowane na podstawie wyników badań własności dynamicznych i na podstawie obliczeń dynamicznych charakterystyk amplitudowych przeprowadzonych w oparciu o metodę elementów skończonych, na zamówienie producenta maszyny.

Wartość częstotliwości drgań własnych **7.8 Hz** – podana w nawiasie obok częstotliwości **6.9 Hz** – jest wartością wyznaczoną na podstawie wyników obliczeń dynamicznych w oparciu o metodę elementów skończonych, zrealizowanych przez producenta maszyny. Jest to przykład na to, że wyniki obliczeń dynamicznych przeprowadzonych w oparciu o różne modele, mogą być różne. Zatem wyniki obliczeń uzyskane w oparciu o metodę elementów skończonych powinny być weryfikowane wynikami badań własności dynamicznych.

Tabela 3. Porównanie wyników badań oraz wyników obliczeń własności dynamicznych konstrukcji

WYNIKI BADAŃ			WYNIKI OBLICZEŃ
NR 1	NR 2	NR 3	
7.66 Hz	7.79 Hz	7.82 Hz	6.9 Hz (7.8 Hz)
---	---	---	10.2 Hz
21.8 Hz	---	21.7 Hz	21.0 Hz
---	---	---	25.6 Hz
---	---	33.2 Hz	32.6 Hz
37.7 Hz	---	---	38.1 Hz
45.8 Hz	---	---	46.0 Hz
52.0 Hz	52.7 Hz	51.5 Hz	51.5 Hz
62.0 Hz	62.1 Hz	---	63.6 Hz
66.9 Hz	67.4 Hz	---	---
75.4 Hz	76.5 Hz	---	---

Siedem częstotliwości drgań własnych wymienionych w przedstawionej tabeli zostało wyznaczonych zarówno na podstawie wyników obliczeń jak i na podstawie wyników badań własności dynamicznych z rozbieżnością między wartościami częstotliwości nie przekraczającą kilku procent. Częstotliwości te zostały zaznaczone pogrubioną czcionką. Tylko dwie z tych częstotliwości zostały wyznaczone na podstawie wyników testów nr 1, nr 2 i nr 3, trzy z nich – tylko podczas jednego z tych testów.

Częstotliwości drgań własnych wynoszące **10.2 Hz** oraz **25.6 Hz** (zaznaczone kolorem szarym), wyznaczone z obliczeń dynamicznych charakterystyk amplitudowych nie zostały zidentyfikowane, ponieważ podczas pracy maszyny papierniczej w całym zakresie ustawianych prędkości nie występowały wymuszenia o tych częstotliwościach.

Z kolei częstotliwości drgań własnych – **67.4 Hz** oraz **76.5 Hz** (zaznaczone kolorem jasnoszarym, pochyloną czcionką) – wyznaczone na podstawie wyników badań własności dynamicznych – nie zostały wyznaczone na podstawie obliczeń.

Należy wziąć pod uwagę fakt, że wartości odpowiedzi drganiowej na działające wymuszenia zależą od stanu technicznego podzespołów zamocowanych do konstrukcji wsporczej. W przypadku małych wartości wymuszeń działających na zespół prasowy odpowiedź drganiowa będzie miała również małe wartości, przez co stosunek sygnału do szumu będzie mały, a błędy estymacji – duże. Np. bardzo małe wartości odpowiedzi drganiowych na wymuszenia wynikające z wad powierzchni wałów prasowych były mierzone podczas badań dynamicznych nr 3. Podczas tych badań stan płaszczy gumowych wałów prasowych był bardzo dobry. Wynikało to z większej świadomości, jakim zagrożeniem jest niewłaściwy stan powierzchni wałów prasowych. W związku z tym firmy prowadzące remonty wałów prasowych były (i są nadal) znacznie bardziej kontrolowane przez użytkowników maszyny papierniczej pod kątem poprawności realizacji regeneracji powierzchni wałów.

6. PODSUMOWANIE

W przypadku, gdy liniowy model konstrukcji jest wystarczająco dokładny, można przyjąć, że własności dynamiczne konstrukcji mechanicznych nie są zależne od działających na nie wymuszeń [10, s. 9-34]. Jeżeli z budowy i zasady działania maszyny wynika, że podczas postoju i podczas eksploatacji mamy do czynienia z tym samym układem mechanicznym, badania własności dynamicznych lepiej jest przeprowadzić podczas postoju. W takim przypadku można przeprowadzić pełną estymację własności dynamicznych w oparciu o wyniki pomiarów wymuszeń oraz odpowiedzi drganiowych.

Z omówionych w drugiej części artykułu cech części prasowych maszyn papierniczych wynika, że podczas ich postoju mamy do czynienia z innym układem mechanicznym niż podczas eksploatacji. W związku z tym badania własności dynamicznych części prasowych maszyn papierniczych przeprowadzone podczas postoju nie prowadzą do uzyskania wiarygodnych informacji o zachowaniu dynamicznym części prasowych podczas eksploatacji. Uzyskanie wiarygodnego opisu zachowania dynamicznego części prasowych maszyn papierniczych podczas eksploatacji możliwe jest tylko na podstawie badań własności dynamicznych w warunkach eksploatacyjnych.

Przedstawione w trzeciej części artykułu wyniki badań własności dynamicznych konstrukcji oraz wyniki obliczeń w oparciu o metodę elementów skończonych były podstawą podjęcia decyzji o realizacji modernizacji konstrukcji wspanie, ponieważ wyraźnie wskazały na potencjalne zagrożenia stanu technicznego w wyniku znacznych wzmocnień odpowiedzi drganiowych, szczególnie groźnych już w przypadku początkowej fazy rozwoju uszkodzeń. Analiza skuteczności przeprowadzonej modernizacji konstrukcji wspanie będzie przedmiotem osobnego artykułu.

7. LITERATURA

- [1] Brincker R., Zhang L., Andersen P.: *Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition*. Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, February 2000.
- [2] Ewins D. J.: *Modal Testing. Theory and Practice*. John Wiley & Sons Inc, New York, 1984.
- [3] James G. H., Carne T. G., Laufer J. P.: *The Natural Excitation Technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures*. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis 10(4), pp.260-277.
- [4] Mohanty P.: *Operational Modal Analysis In the Presence of Harmonic Excitations*. Indian Institute of Technology, Delft 2005.
- [5] Sordyl F., Sordyl I.: *Identyfikacja własności dynamicznych obiektów realizowana w ramach diagnostyki technicznej*. Diagnostyka, vol. 23, 2000, s. 69-73.
- [6] Sordyl F., Sordyl I.: *Ocena wpływu własności dynamicznych wspornika na własności eksploatacyjne maszyny papierniczej*. 2001, www.vibroexpert.com.pl.
- [7] Sordyl F., Sordyl I.: *Ocena wpływu własności dynamicznych części prasowej maszyny papierniczej na poziom drgań obudów łożysk wałów i cylindra*. 2004, www.vibroexpert.com.pl.
- [8] Uhl T.: *Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1997.
- [9] Uhl T., Lisowski W.: *Eksploatacyjna analiza modalna*. Wydawnictwo Katedry Dynamiki Maszyn i Robotyki, 1999, AGH w Krakowie.
- [10] Zaveri K., Phil M.: *Modal Analysis of Large Structures*. Multiple Exciter Systems, Brüel&Kjær, 1984.

Informacja o autorach zamieszczona jest na stronie 55.