

Ocena własności wibroakustycznych krążników z wykorzystaniem klasycznej analizy modalnej

Estimation of vibro-acoustic properties of idlers based on modal analysis

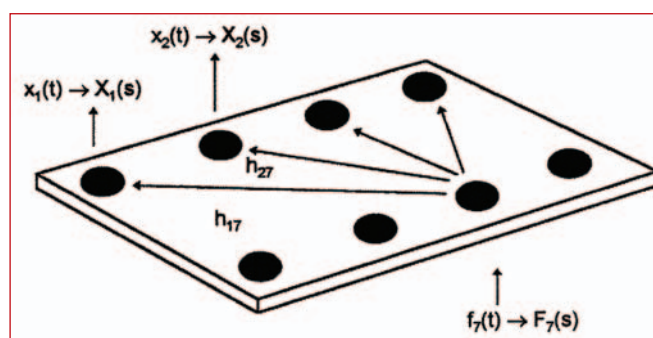
Robert Król, Wojciech Sawicki

Przenośniki taśmowe stosowane są obecnie na masową skalę w przemyśle wydobywczym. Niejednokrotnie wielokilometrowe trasy przenośników przebiegają w pobliżu siedlisk ludzkich i mogą stanowić uciążliwość, polegającą na nadmiernej emisji hałasu do otoczenia. Obniżenie poziomu tego hałasu można realizować w sposób bierny, budując ekrany akustyczne lub aktywne – redukując poziom emisji u źródła. Hałas może pochodzić od zużytych łożysk, które generując drgania płaszcza, emitowane są do otoczenia w postaci fali akustycznej. Firma SKF stworzyła urządzenie do monitorowania stanu łożysk w oparciu o emisję hałasu, tj. SKF Idler Sound Monitor Kit [1]. To praktyczne urządzenie ma trzy stany: dobry, podejrzany i zły. Generalną zasadą jest pozostawienie krążników podejrzanych do dalszej pracy. Dlatego też zadbanie o odpowiednie cechy wibroakustyczne płaszcza krążnika ma duży wpływ na później generowany hałas przez trasę przenośnika taśmowego.

Ocenę skuteczności wytłumienia krążników można również przeprowadzić w terenie, instalując na pewnej reprezentatywnej długości przenośnika taśmowego badany typ krążnika. Jest to jednak rozwiązanie kosztowne, wymaga bowiem posiadania około 300 krążników. Dodatkowym problemem jest zapewnienie jednakowych warunków pracy przenośnika, jak: obciążenie urobkiem, napięcie taśmy, jej prędkość, jak i warunków meteorologicznych: kierunek wiatru, temperatura, wilgotność. Innym sposobem jest zbudowanie specjalnego stanowiska z komorą akustyczną, w której znajduje się pojedynczy krążnik, napędzany pętlą taśmy przechodzącą przez środek komory, wewnątrz której występuje rozproszone pole akustyczne [5]. Stanowisko takie daje dobrą ocenę hałasu generowanego przez pojedynczy krążnik, ale jego budowa jest również kosztowna.

Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej posiada i używa aparaturę oraz oprogramowanie do wykonywania klasycznej analizy modalnej. Analiza modalna jest próbą opisaną dynamiki struktury mechanicznej za pomocą drgań własnych (modów) [2, 8]. Każdy mod opisany jest charakterystyczną częstotliwością drgań własnych, współczynnikiem tłumienia oraz postacią drgań. Te charakterystyczne parametry mogą być określone na podstawie serii pomiarów widmowej funkcji przejścia (FRF) pomiędzy jednym punk-

tem układu a skończoną liczbą innych punktów. Na rys. 1 przedstawiono przykład mierzonego pobudzenia w punkcie 7. i pomiaru odpowiedzi układu w pozostałych punktach, gdzie h_{17} , h_{27} są zespolonymi funkcjami przejścia.



Rys. 1 Tworzenie macierzy funkcji przejścia

W artykule przedstawiono analizę własności dynamicznych dwóch energooszczędnych krążników niekonwencjonalnej konstrukcji [3, 4], wykonanych w wersji z płaszczem stalowym (krążnik K1) i w rozwiązaniu z okładziną poliuretanową (K2). Ocenę przeprowadzono w oparciu o wyniki zmian tłumienia modalnego.

Zestaw pomiarowy

Analiza modalna krążników przeprowadzona została za pomocą jednego akcelerometru Endevco typ 751-10 oraz analizatora Pulse firmy Brüel & Kjør. Analizator ten składa się z oprogramowania i przenośnej kasety, typu 3560C. Kasetą wyposażoną była w 6-kanałowy moduł typu 3032A o dynamice wejść 80 dB, idealnej liniowości oraz zgodności fazowej. Dodatkowym elementem wykorzystanym w teście modalnym było oprogramowanie ME'ScopeVES firmy Vibrant Technology.

Analizie modalnej zostały poddane dwa krążniki, mocowane w uchwytach stanowiska do badania niewyważenia. Na powierzchni każdego krążnika naniesiona została siatka 24 punktów. Pobudzenie następowało za pomocą młotka udarowego typu BK 8202 z wbudowanym czujnikiem siły typu BK 8200. Młotek wyposażony był w stalową końcówkę, gdyż ta dawała możliwość pobudzenia szerokopasmowego. Odpowiedź mierzono akcelerometrem w punkcie 22.,

który został przymocowany za pomocą podstawki magnetycznej (płaszczył stalowy) lub wosku pszczelego (płaszczył poliuretanowy) – rys. 2.

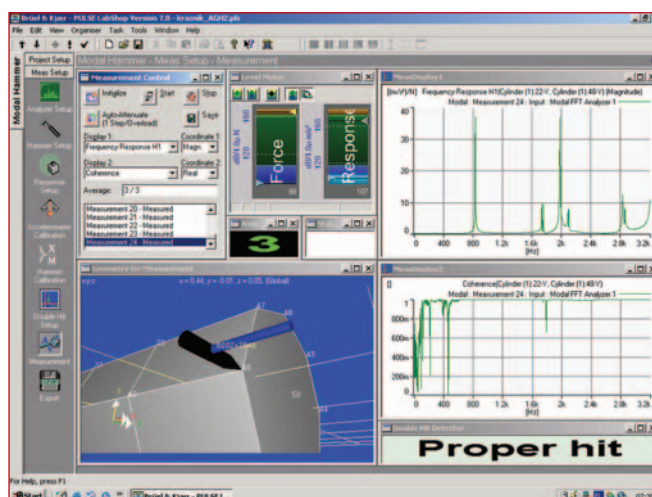


Rys. 2 Dokumentacja fotograficzna z prowadzonych badań wibroakustycznych krążników, po lewej krążnik z płaszczyzną stalową – mocowanie akcelerometru za pomocą podkładki magnetycznej, po prawej krążnik z płaszczyzną poliuretanową – mocowanie akcelerometru za pomocą wosku

Analizator przed wykonaniem analizy FFT nakładał odpowiednio na sygnał pobudzenia i odpowiedzi okno typu transient i wykładnicze, o wcześniej dobranych parametrach. Analiza odbywała się w zakresie częstotliwości 0-3200 Hz, przy rozdzielczości 2 Hz. Pobudzenie krążnika następowało promieniowo we wspomnianych 24 punktach, po trzy razy w każdym. Uzyskana w ten sposób funkcja FRF był średnią z trzech pomiarów. Podczas wykonywania eksperymentu włączona była detekcja podwójnego uderzenia i obserwowany był wykres koherencji. Wartość funkcji koherencji w interesującym zakresie częstotliwości była na poziomie bliskim jedności, co świadczy o dużej powtarzalności uderzeń co do miejsca i kierunku. Analizator Pulse miał ustawione 0,1-sekundowe wyprzedzenie rejestracji w stosunku do impulsu wyzwalającego, którym była siła osiągnięta określony poziom. Cały eksperyment modalny był prowadzony w aplikacji: Modal Test Consultant (MTC), będącej częścią pakietu Pulse (rys. 3). Oprogramowanie MTC na bieżąco informuje operatora, pokazując to na przestrzennym modelu, gdzie należy pobudzić obiekt, ile razy, czy wystąpiło

przesterowanie, podwójne uderzenia, kiedy analizator gotowy jest do następnego pomiaru. Komunikaty te są wysyłane w formie wizualnej, jak i dźwiękowej, co pozwala na prowadzenie eksperymentu w sytuacjach, gdy obiekt jest rozległy i nie można z danego miejsca pobudzenia obserwować ekranu komputera.

Następnie zmierzone widmowe funkcje przejścia (FRF) oraz geometria obiektu zostały przesłane do programu ME'ScopeVES, w którym przeprowadzono dalszą część analizy modalnej. Nazwa oprogramowania ME'ScopeVES, pochodzi od angielskich słów: *Mechanical Engineering Oscilloscope – Visual Engineering Series* i jest generalnie narzędziem do przeprowadzania wtórnych analiz, które pozwalają użytkownikowi obserwować, analizować i dokumentować statyczne i dynamiczne zachowanie struktur mechanicznych. Oprogramowanie to potrafi przedstawić na modelu 3D zmierzone wielkości oraz drgania, przepływy, poziom dźwięku. Za pomocą oprogramowania ME'ScopeVES można importować wielokanałowe pomiary w dziedzinie czasu lub częstotliwości, a następnie przeprowadzić analizę modalną lub analizę ODS, wyświetlając odkształcenia struktury w formie animacji. Dane pomiarowe mogą pochodzić z różnych systemów pomiarowych i być zapisane w różnych formatach binarnych. Program ME'Scope pozwala na zidentyfikowanie poszczególnych modów z użyciem technik dopasowywania krzywych. Każdy z modów opisywany jest za pomocą częstotliwości, tłumienia i postaci drgań. Stosując inne techniki, jak metoda elementów skończonych, można również uzyskać informacje o częstotliwości i postaci drgań własnych struktury, jednak szacowanie tłumienia obarczone jest dużą niedokładnością. Na rys. 3, w prawym górnym rogu widać przykładową funkcję FRF, wyraźne rezonanse odseparowane od siebie świadczą o małym sprzężeniu modalnym.



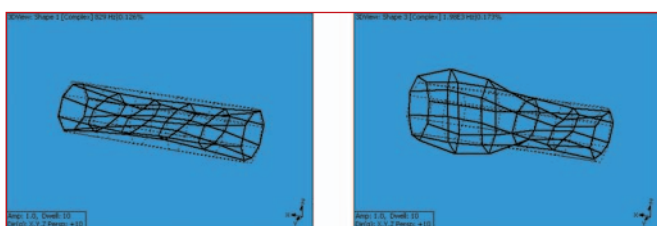
Rys. 3 Zrzut ekranowy oprogramowania wspomagającego wykonanie testu modalnego: Modal Test Consultant, będącego częścią pakietu Pulse

Wyniki pomiarów

Badaniem poddano dwa krążniki K1 o płaszczyźnie stalowej i K2 o płaszczyźnie z tworzywa sztucznego (poliuretan). W wyniku przeprowadzonej analizy modalnej uzyskano pięć pierw-

szych w przypadku K1 i sześć pierwszych w przypadku K2 modów drgań krążnika.

Na rys. 4 przedstawiono przykładowe postacie drgań własnych krążnika K1 w rzucie perspektywicznym. Postacie te można utożsamiać z charakterem odkształceń struktury, gdy ta jest pobudzana częstotliwością rezonansową; dla lepszego zobrazowania zastosowano przeskalowanie. Mod pierwszy charakteryzuje się spłaszczeniem środkowej części krążnika, mod trzeci z kolei naprzemiennym spłaszczaniem dwu połówek krążnika. Widać, że sztywność płaszcza w okolicach piast jest dużo większa niż w środku. Na podstawie analizy postaci drgań można proponować modyfikacje struktury i taka próba zmniejszenia drgań związanych z pierwszym modem powinna odbyć się przez usztywnienie środkowej części, np. przez wspawanie wewnętrznego pierścienia.



Rys. 4 Pierwszy i trzeci mod drgań krążnika K1

Poszczególne mody wraz ze swoimi częstotliwościami i tłumieniami (procent tłumienia krytycznego) dla krążnika K1 i K2 zebrane zostały w tabelach 1 i 2.

Mod	Częstotliwość [Hz]	Tłumienie [%]
1	829	0,126
2	1730	0,091
3	1980	0,173
4	2080	0,136
5	2830	0,186

Tabela 1 Częstotliwość i tłumienie dla poszczególnych modów krążnika K1

Mod	Częstotliwość [Hz]	Tłumienie [%]
1	937	1,020
2	1720	0,617
3	2300	1,140
4	2520	1,070
5	2980	0,352
6	3010	0,752

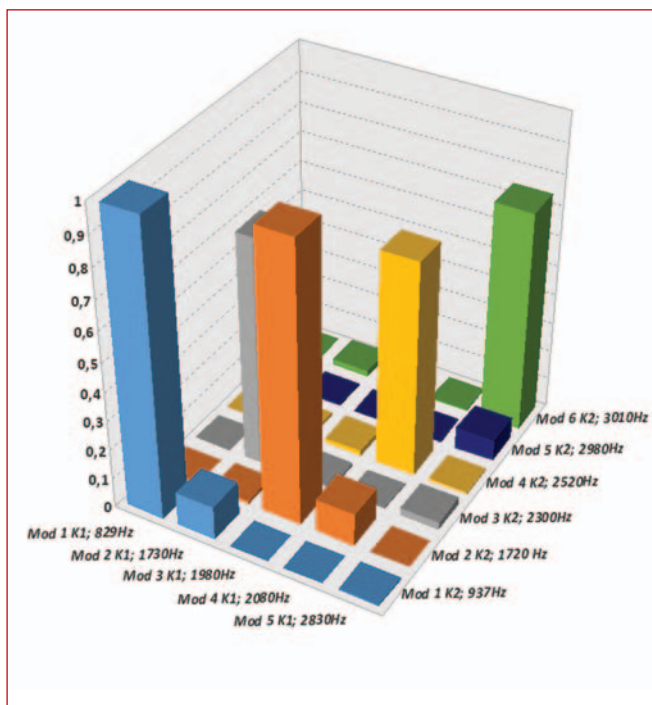
Tabela 2 Częstotliwość i tłumienie dla poszczególnych modów krążnika K2

W celu porównania wyników testu dla obydwu krążników policzona została macierz MAC (*Matrix Assurance Criterion*), która jest iloczynem skalarnym wektorów opisujących mody, a wyniki przedstawia tabela 3. Iloczyn skalarny jednakowych modów równy jest 1, a jednoznacznie różnych (prostopadłych) równy 0.

K1	K2					
	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5	Mod 6
Mod 1	0,990	0,001	0,001	0,000	0,001	0,005
Mod 2	0,115	0,009	0,769	0,007	0,006	0,018
Mod 3	0,000	0,939	0,006	0,017	0,001	0,003
Mod 4	0,001	0,112	0,003	0,726	0,001	0,002
Mod 5	0,005	0,000	0,027	0,008	0,073	0,746

Tabela 3 Macierz MAC

Analiza macierzy MAC pozwoliła odrzucić mod piąty krążnika K2, gdyż nie jest on podobny do żadnego z modów krążnika K1. Uśrednione tłumienia dla pięciu modów krążnika K1 i K2 wynoszą odpowiednio 0,143% i 0,92% tłumienia krytycznego.



Rys. 7 Graficzne przedstawienie macierzy MAC

Ocena zdolności tłumienia na podstawie wyników tłumienia otrzymanych z modelu modalnego

Uzyskane wyniki analizy modalnej posłużyły do wykonania oceny skuteczności tłumienia. Jako decydujący parametr wybrano wspomniane tłumienie modalne. Tłumienie modalne każdego z krążników zostało odniesione do tłumienia krążnika referencyjnego K0 [6], zgodnie z przyjętą metodologią, wzór (1). Krążnik K0 był typowym krążnikiem wykonanym w wersji z płaszczem stalowym, stosowany w polskim górnictwie węgla brunatnego.

$$dL_p = 20 \log \frac{c_i}{c_{K0}} \quad (1)$$

gdzie:

dL_p – różnica w poziomie dźwięku,

c_i – wielkość tłumienia krytycznego i -tego krążnika,

c_{K0} – wielkość tłumienia krytycznego krążnika K0.

W tabeli 4 zestawiono porównanie uzyskanych wyników badań.

	K0	K1	K2
dL_p [dB]	0,0	-1,5	14,7

Tabela 4 Różnice w poziomie dźwięku generowanym przez krążniki K1 i K2

Biorąc pod uwagę odczucie głośności skali decybelowej (tabela 5) oraz wyniki przedstawionych analiz, należy stwierdzić, że krążnik K1 gorzej tłumia drgania (znak minus) niż modelowy krążnik K0, jednak zmiana ta jest niezauważalna. W przypadku krążnika K2 badania wykazały, że wyraźnie lepiej tłumia on drgania, a człowiek odczuwa to jako dużą zmianę.

Zmiana poziomu dźwięku w [dB]	Zmiana odczuwalnej głośności
3	ledwo zauważalna
5	wyraźna zmiana
10	dwukrotnie głośniejsz
15	duża zmiana
20	czterokrotnie głośniejsz

Tabela 5 Odczuwanie skali decybelowej wg [6]

Podsumowanie

Przedstawiona metoda pomiarowa bazuje na założeniu, że głównym źródłem hałasu jest płaszcz krążnika i to jego cechy wibroakustyczne są tylko badane. Badanie to oparte jest na klasycznej analizie modalnej, a w szczególności na oszacowaniu średniego tłumienia modalnego. Ocenę własności tłumiących przyjętych do badań krążników przeprowadzono po zastosowaniu uproszczenia, polegającego na tym, że tłumienie modalne jest wprost proporcjonalne do poziomu dźwięku emitowanego przez krążnik pobudzony impulsem szerokopasmowym. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zastosowany rodzaj poliuretanu na okładzinę płaszcza krążnika K2 cechują bardzo dobre własności tłumiące.

Praca zrealizowana w ramach projektu badawczego 7062/B/T02/2011/40

Abstract

The attempt to estimate vibro-acoustic properties of idlers has been presented in this paper. The methodology is based on experimental technique called modal analysis. It has

been proved that modal damping is strictly connected with real damping of structure. Modal analysis has been performed for two idlers K1 and K2. The averaged modal damping values of analyzed idlers have been compared with the reference one. ■

Literatura

[1] CM-P8-11084-EN-SKF-Idler-Sound-Monitor-Kit.pdf dostępny na stronie firmowej www.skf.com

[2] Ewins D.J.: *Modal Testing: Theory, Practice and Application* (2nd ed.), Research Studies Press, Baldock, UK 2000.

[3] Furmanik K., Kasza P.: *Badania oporu obracania krążnika nowej konstrukcji*, *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, nr 3(17)/2012, s. 52-55.

[4] Furmanik K., Wieloch S.: *Propozycja nowego rozwiązania krążnika*, *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, nr 3(9)/2010, s. 13-15.

[5] Horstmeier R.: *Zur Schallemission von Gurtförderanlagen*, praca doktorska, Uniwersytet w Hanowerze, 1981.

[6] Sawicki W., Król R.: *Ocena skuteczności wytłumienia krążników za pomocą analizy modalnej*, *Górnictwo i geologia VIII, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, 31/2005; ISSN 0370-0798.

[7] *Transducers & Conditioning*, Bruel&Kjaer interactive CD-ROM, 1999.

[8] Uhl T.: *Komputerowo wspomaganą identyfikacją modeli konstrukcji mechanicznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1997.

dr inż. Robert Król

dr inż. Wojciech Sawicki

Politechnika Wroclawska