

	<b>Organizatorzy:</b>  Politechnika Łódzka  Wydział Mechaniczny	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ</b> <b>Łódź - Uniejów</b> 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

## Analiza niewyważenia wrzeciennika szlifierki w oparciu o analizę drgań

### Vibration analysis based on unbalance of the grinding spindle

**RYSZARD WÓJCIK**  
**RADOSŁAW WOŹNIAK \***

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.397

W opracowaniu przedstawiono stanowisko badawcze zbudowane na bazie szlifierki dwutarczowej. Z uwagi na większe możliwości wprowadzania zmian w obszarze obciążenia tarcz. Jednocześnie starano się nie ingerować w obszar wrzeciennika szlifierki, ponieważ jakiegokolwiek zmiany konstrukcyjne mogłyby spowodować awarię układu wrzeciona co naraża prowadzących badania na znaczne koszty naprawy. Stąd wstępne badania przeprowadzono na uproszczonym stanowisku badawczym.

**SŁOWA KLUCZOWE:** analiza drganiowa, niewyważenie wrzeciona

*The paper describes research station built on the double disc grinding machines. Due to the increased possibility of introducing changes in the load wheels. At the same time tried not to interfere with grinding headstock area, because any design modifications that could cause failure of the spindle which exposes conducting research on significant repair costs. Therefore, a preliminary study was carried out on a simplified bench.*

**KEYWORDS:** vibration analysis, spindle unbalance

Zjawiska drganiowe występują w otaczającym nas współczesnym świecie zgrubnie można podzielić na pożądane oraz niepożądane. Sam fakt występowania drgań nie musi nieść za sobą negatywnych konsekwencji. W większości przypadków drgania, a raczej ich zbyt duży poziom, rodzą wiele problemów technicznych wywołując, nie tylko zagrożenia bezpieczeństwa podczas pracy, ale również zwiększając koszty użytkowania wielu urządzeń [1].

Diagnostyka drgań pozwala na wczesne wykrywanie

oraz ocenę nasilenia mierzonych drgań, dzięki czemu można podjąć odpowiednio wcześniej środki zaradcze w celu ich eliminacji lub zmniejszenia negatywnego ich wpływu. Analiza drgań pozwala na ocenę stanu zużycia łożysk co może

przekładać się na wymierne korzyści przedsiębiorstw dzięki uniknięciu bezzasadnych wymian łożysk, nieplanowanych remontów oraz postojów będących ich wynikiem. Analiza drgań to nie tylko badania łożysk, to również możliwość oceny wielu innych uszkodzeń i defektów, które mogą bezpośrednio wpływać na bezpieczeństwo pracy lub żywotność maszyn.

Dzięki możliwości wyważania wirujących elementów przy zastosowaniu analizy drgań można wydłużyć czas pracy np. wentylatorów tłoczących powietrze na hale produkcyjne, zmniejszyć hałas wynikający z drgań oraz ograniczyć koszty związane ze stratami energii zamienianej na bezproduktywne drgania.

#### Stanowisko badawcze

Układ badawczy został zrealizowany na bazie szlifierki dwutarczowej Graphite 59G383 w celu określenia niewyważenia tarcz ściernych. Do celów badawczych ściernica została zastąpiona aluminiowymi tarczami z 24 otworami gwintowanymi w powierzchni bocznej. Dla zwiększenia możliwości eksperymentalnych nagwintowano dwa rzędy otworów na różnych promieniach. Jako masy korekcyjne wykorzystano wkręty walcowe o różnej długości dzięki czemu uzyskano zróżnicowane masy [2]. Do oceny skuteczności i zasadności procesu wyważania przeprowadzane zostały pomiary drgań przed wyważaniem oraz po jego zakończeniu. Na rys. 1 zaprezentowano uproszczone stanowisko badawcze.

\* dr hab. inż. Ryszard Wójcik (ryszard.wojcik@p.lodz.pl),  
mgr inż. Radosław Woźniak

Wybrane parametry szlifierki dwutarczowej:

Moc: 370 W.

Prędkość obrotowa (nominalna): 2 850 obr/min = 47,5 Hz.

Masa wirnika (bez łożysk): 1 112,43 g.

Masa wirująca: 3 870,46 g.

Masa całkowita szlifierki (oryginalnie): 9 500 g.

Masa całkowita (po modyfikacji z tarczami do wyważania):

9 450 g.



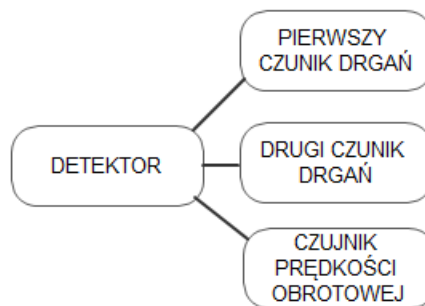
Rys. 1. Stanowisko badawcze do pomiaru drgań i niewyważenia ściernicy

Masa wirująca składa się z: masy wirnika wraz z wałem, połowy masy łożysk, ponieważ pierścień zewnętrzny łożyska osadzony jest nieruchomo w oprawie, obracają się tylko elementy toczne oraz pierścień wewnętrzny, masy nakrętek oraz podkładek mocujących tarczę do wyważania. Dokładne określenie całkowitej masy wirującej pozwala na bardziej precyzyjne wyważanie. Obliczenia masy korekcyjnej przeprowadzane zostały na podstawie masy wirnika oraz pomiarów wpływu masy testowej na niewyważenie. Czym bardziej precyzyjnie zostanie określona masa wirująca, tym obliczenia mas korekcyjnych będą dokładniejsze, co pozwoli na zredukowanie niewyważenia.

Do badań wykorzystano sprzęt pomiarowy, urządzenie mobilne do pomiarów off – line - Detector III firmy FAG składający się z dwóch zestawów:

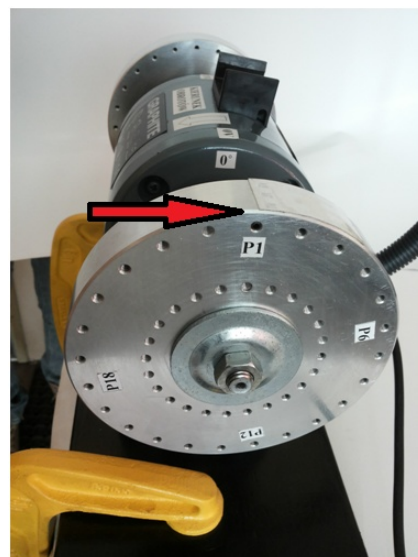
- detektor wraz z czujnikiem drgań,
- zestaw rozszerzający możliwości detektora o badanie niewyważenia (dodatkowy czujnik drgań, uchwyty i czujniki prędkości obrotowej), schemat urządzenia pomiarowego do badania niewyważenia przedstawia rys. 2.

Przed przystąpieniem do pomiarów należało określić szereg danych, które są potrzebne do ustawień punktów pomiarowych przesyłanych do detektora. Należy określić kąt pomiędzy wybranym typem krawędzi czujnika obrotów (początek lub koniec taśmy refleksyjnej – krawędź pozytywna lub negatywna) a pierwszym punktem w którym można dodawać masę korekcyjną (dyskretne określenie pozycji ciężarków). Rys. 3 przedstawia ustawienie początku taśmy refleksyjnej względem punktu P1 na 0° (tarcza obraca się w lewo). Dla ułatwienia procesu wyważania celowo zostały wykonane 24 gwintowane otwory w tarczach (otwór występuje co 15°). Pozwala to na łatwy i szybki montaż mas korekcyjnych w dyskretnych punktach oraz na ich demontaż.



Rys. 2. Schemat urządzenia pomiarowego do badania niewyważenia

Każdy z otworów jest numerowany, punkty od P1 do P24 co ułatwia określenie miejsca dodania ciężarka. Aby nie zmieniać pozycji czujnika obrotów z płaszczyzny pierwszej na drugą, pozycje P1 na obydwu tarczach pokrywają się ze sobą. Dzięki temu pomiar prędkości obrotowej wrzeczona odbywał się z tego samego miejsca (uniknięto błędów związanych z ponownym ustawianiem czujnika oraz zaoszczędzono czas który byłby potrzebny na relokację czujnika).



Rys. 3. Przykład ustawienia kąta 0° między krawędzią taśmy refleksyjnej a punktem P1

### Przebieg wyważania

Proces wyważania składał się z następujących czynności:

1. Zebranie informacji na temat badanego układu.
2. Konfiguracja pomiarów drgań według normy ISO 10816 [3].
3. Konfiguracja wyważania (określenie pozycji czujnika obrotów, czujników drgań, podział płaszczyzn wyważania na punkty oraz określenie promienia umieszczenia mas korekcyjnych).
4. Przesłanie konfiguracji do detektora.
5. Pomiar drgań wg ISO.
6. Rozpoczęcie wyważania – pomiar prędkości obrotowej.
7. Bieg referencyjny dla wszystkich pozycji czujników – wyznaczane są miejsca oraz wartości największych drgań.
8. Dodanie masy próbnej w płaszczyźnie 0, bieg testowy, możliwość usunięcia lub pozostawienia masy próbnej.
9. Dodanie masy próbnej w płaszczyźnie 1, bieg testowy, możliwość usunięcia lub pozostawienia masy próbnej.

10. Dodanie masy korekcyjnej w dwóch płaszczyznach, bieg wyważania.
11. W przypadku niedostatecznej redukcji amplitud powraca się do punktu 10 (ale tylko do 3 razy, przy większej ilości prób powraca się do punktu 8).
12. Po odpowiednim dla prędkości obrotowej zredukowaniu amplitud wykonuje się pomiar drgań wg ISO.
13. Przesłanie danych do programu w celu łatwiejszego sprawdzenia i zachowania wyników (dane można również przeglądać na urządzeniu).

### Przebieg badań

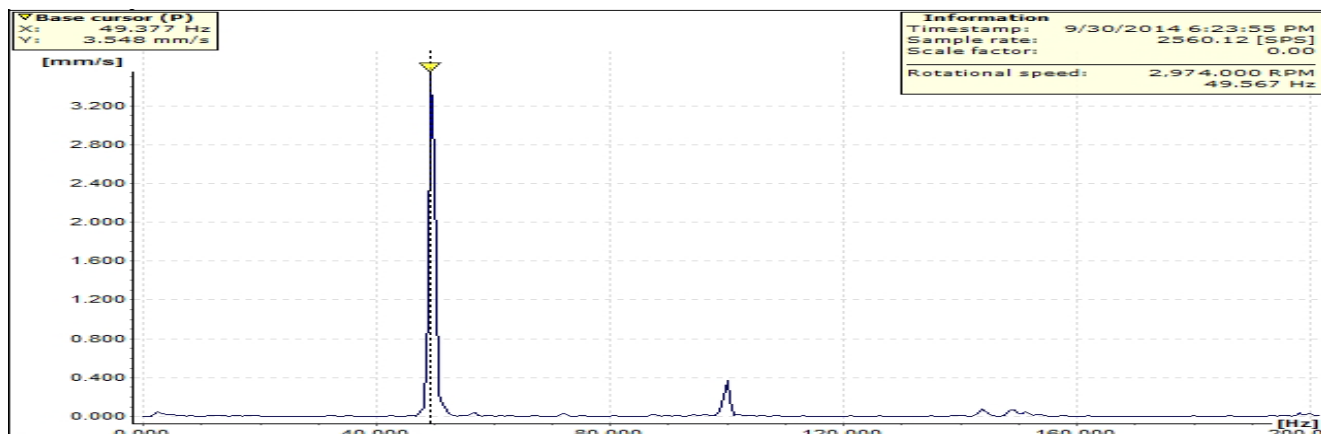
Zgodnie z normą ISO 10816 mierzone były drgania w trzech kierunkach: pionowym, poziomym oraz osiowym. Wyniki otrzymanych pomiarów ocenione zostały na podstawie w tabeli 1 opisującej różne poziomy drgań w zależności od mocy oraz stanu maszyny. Pomiar na szlifierce dwutarczowej odbywał się tylko w kierunku pionowym oraz poziomym – wynikało to z możliwości technicznych pomiaru. Mimo to taki pomiar daje informację o stanie urządzenia, które można uznać za wiarygodne. Dla zasymulowania wpływu posadowienia urządzenia na wyniki drgań zostały przeprowadzone pomiary drgań w oparciu o parametr ISO.

Tab. 1. Wartości granicznych stref klasyfikacyjnych intensywności drgań [4]

Średniokwadratowe wartości prędkości drgań [mm/s] $V_{rms}$	Typowe wartości graniczne stref klasyfikacyjnych intensywności drgań			
	Kl. 1	Kl. 2	Kl. 3	Kl. 4
0,45	A	A		
0,71			A	A
1,12	B			
1,8		B		
2,8	C		B	
4,5		C		B
7,1			C	
11,2				C
18	D	D		
28			D	
45				D

Wykonane zostały trzy pomiary drgań szlifierki (bez wymuszonego niewyważenia):

a)



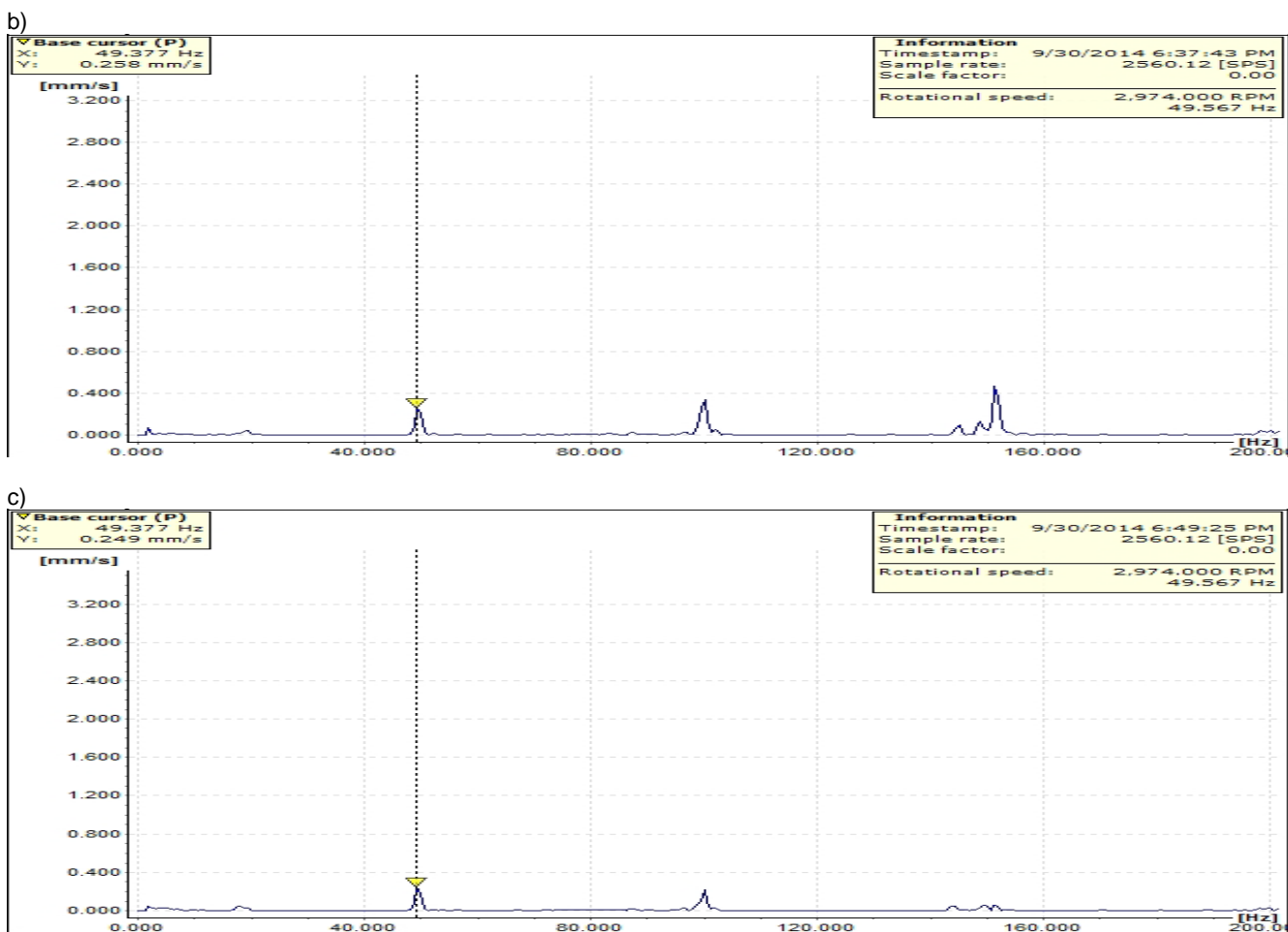
1. Niezamocowanej na stałe do podłoża – stojąca tylko na wibroizolatorach.
2. Zamocowana do sztywno przymocowanej do podłoża drewnianej podstawy. Przykręcona w kierunku pionowym do deski.
3. Zamocowanie takie jak w punkcie 2, ale dodatkowo pod szlifierkę została podłożona dodatkowa drewniana podstawa w celu odizolowania wibroizolatorów szlifierki.

Wartości osi na porównywanych wykresach zostały ujednolicone w celu łatwiejszej analizy. Wynika z niej jednoznacznie, iż luźne posadowienie urządzenia wpływa negatywnie na poziom generowanych drgań rys. 4a. W pierwszym przypadku drgania były największe, ponieważ wibroizolator nie był w żaden sposób związany z podłożem, a zatem nie tłumił drgań. Na poniższych wykresach widać występujący w prędkości obrotowej pik świadczący o niewyważeniu urządzenia. Na podstawie średniej prędkości drgań RMS oceniany jest stan maszyny w oparciu o Tabele 1. Badane urządzenie należy do 1 klasy maszyn [5], a zmierzone drgania zamocowanej szlifierki odpowiadają nowej maszynie – rys.4b oraz rys.4c. Gdyby interpretować wartość RMS dla niezamocowanej szlifierki należałoby ją zakwalifikować do wyważania. Wykresy przedstawiają wartości drgań w dziedzinie częstotliwości. Dla łatwiejszej oceny stanu stosuje się wartości średnie, które przedstawia tabela 2 wyniki z wykresów przedstawionych na rys. 4.

Tab. 2. Wartości średnich prędkości drgań w zależności od sposobu montażu szlifierki

Sposób montażu	Wartość prędkości drgań RMS [mm/s]
1	2,66
2	0,56
3	0,40

Wartości w tabeli 2 wskazują jak duży wpływ na wyniki pomiarów ma sposób mocowania maszyny do podłoża. Nieprawidłowości w tym obszarze mogą powodować problemy nie tylko w ocenie stanu maszyny, ale również stwarzać niebezpieczeństwo wywołane negatywnymi skutkami drgań.



Rys. 2. Wpływ sposobu montażu urządzenia na zebrane drgania, wykresy dla szlifierki: a) niezamocowanej, b) zamocowanej tylko do jednej podstawy, c) zamocowanej do dwóch podstaw (odizolowano wibroizolatory)

### Wyważanie tarcz na szlifierce dwutarczowej

Pierwsza seria pomiarowa wyważania została wykonana dla promienia rozmieszczenia ciężarków  $r = 68$  mm (połowa średnicy = 136 mm), druga zaś dla promienia  $r = 40$  mm (połowa średnicy = 80 mm). Celem przeprowadzenia dwóch serii wyważania na różnych średnicach było wykazanie wpływu zmiany promienia mocowania ciężarków na ich wartości drgań. Pomiar odbywał się na szlifierce przymocowanej do dwóch podstaw. W celu pokazania zmian wartości drgań wykonane zostały pomiary: przed dołożeniem wymuszonego niewyważenia, po jego montażu oraz po procesie wyważania. Wyniki pomiarów przedstawia tabela 3.

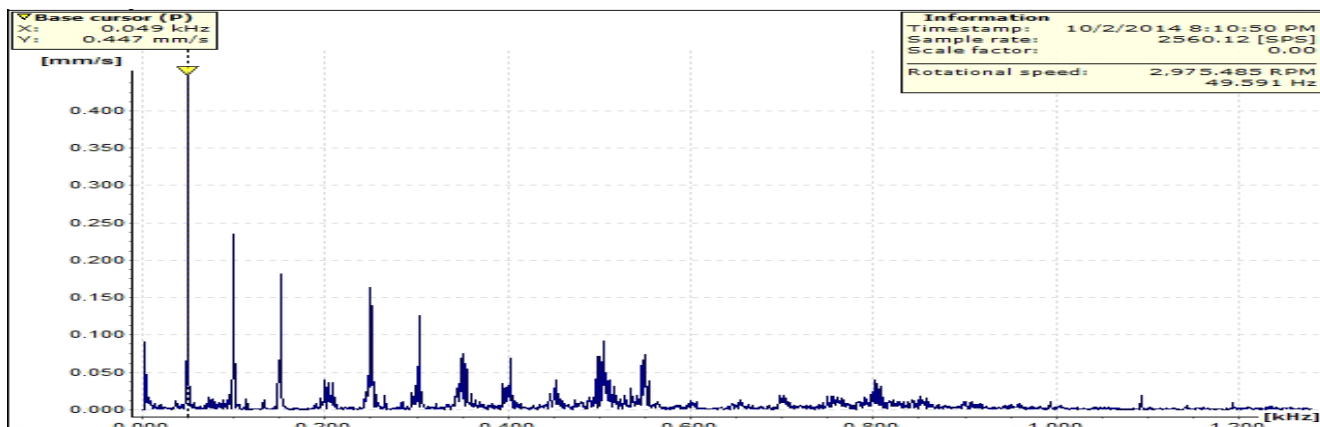
Tab. 3. Zmierzone wartości drgań.

Pomiar	bez wymuszonego niewyważenia [mm/s]		z wymuszonego niewyważenia m [mm/s]		po wyważeniu [mm/s]	
	r=68 mm	r=40 mm	r=68 mm	r=40 mm	r=68 mm	r=40 mm
0V - pionowo	1,43	1,17	4,41	3,70	0,52	0,40
0H - poziomo	1,36	1,37	6,25	6,21	0,55	0,61
1V - pionowo	0,50	0,45	2,20	1,98	0,27	0,29
1H - poziomo	2,04	2,16	6,56	6,80	0,47	0,52
Pik <sup>1</sup>	1,83	1,49	5,88	4,92	0,44	0,16

<sup>1</sup> Plik w częstotliwości obrotowej (widmo prędkości) dla punktu 0V.

Z analizy tabeli 3 wynika, iż układ bez wymuszonego niewyważenia generował drgania odpowiadające eksploatacyjnemu urządzeniu zdolnemu do ciągłej pracy. Po zamontowaniu niewyważenia drgania osiągnęły poziom dla maszyn niezdolnych do ciągłej pracy lub nawet zagrażających bezpieczeństwu pracy. Wartości (dla pomiaru z wymuszonym niewyważeniem) potwierdzają zasadność przeprowadzenia wyważania w celu eliminacji drgań. Prawidłowo wykonane wyważenie spowodowało obniżenia poziomu drgań od 8 do 14 razy (dla  $r = 68$  mm). Wyniki po wyważeniu pozwoliły zakwalifikować poziom drgań zmierzony na układzie do poziomu odpowiadającego nowemu urządzeniu, co dodatkowo potwierdza skuteczność przeprowadzonego procesu. Opisany pomiar jest jednym z narzędzi do oceny skuteczności lub zasadności przeprowadzania wyważania (niewyważenie generuje duże drgania). Dodatkowo niewyważenie jest widoczne w widmie prędkości jako pik w częstotliwości obrotowej. Z pomiaru wartości prędkości drgań w częstotliwości obrotowej dla punktu 0V wynika, iż niewyważenie zostało kilkunastokrotnie zredukowane.

Z wykresu widma prędkości przedstawionego na rys. 5 można odczytać, iż w układzie występuje błąd osiowania. Na wykresie ten błąd przejawia się występowaniem harmonicznej prędkości obrotowej. W poniższym przypadku harmoniczna ma połowę wartości pikowej częstotliwości obrotowej – odpowiada to opisowi błędu osiowania. Wpływ na taki pomiar może mieć fakt, iż tarcze aluminiowe posiadają bicia w kierunku osiowym na poziomie 0,1 mm (wynika to ze sposobu montażu).



Rys. 3. Wykres widma prędkości po wyważeniu - błąd osiowania

Dla porównania skuteczności procesów wyważania dla dwóch promieni została przygotowana tabela 4. Przedstawia ona wartości amplitud przed oraz po wyważeniu. Dla łatwiejszej analizy skuteczność redukcji niewyważenia została przeliczona na procenty.

Tab. 4. Porównanie skuteczności procesów wyważania

Punkt pomiarowy	Amplituda przed wyważeniem [ $\mu\text{m}$ ]		Amplituda po wyważeniu [ $\mu\text{m}$ ]		Redukcja niewyważenia [%]	
	r = 68 mm	r = 40 mm	r = 68 mm	r = 40 mm	r = 68 mm	r = 40 mm
0V	35,92	39,34	3,06	0,44	91,48	98,89
0H	55,10	56,05	2,53	1,08	95,41	98,08
1V	19,91	16,10	0,48	0,74	97,58	95,42
1H	60,92	63,25	1,56	2,27	97,44	96,41

Z analizy wyników wyważania dla dwóch badanych promieni dokładania mas korekcyjnych wynika, iż na mniejszej średnicy musi zostać założony większy ciężarek w celu wyeliminowania tego samego niewyważenia. Jest to logiczne, ponieważ na krótszym promieniu ta sama masa wytwarza inną siłę niż na większym promieniu. Tabela 5 przedstawia wartości dodanych mas korekcyjnych, które jednoznacznie potwierdzają powyższe stwierdzenia.

Tab. 5. Łączne wartości dodanych mas korekcyjnych [g]

	Wyważanie	
	r = 68mm	r = 40mm
Płaszczyzna 1	2,44	3,97
Płaszczyzna 2	2,12	4,66

### Pomiar wybieg/rozbieg

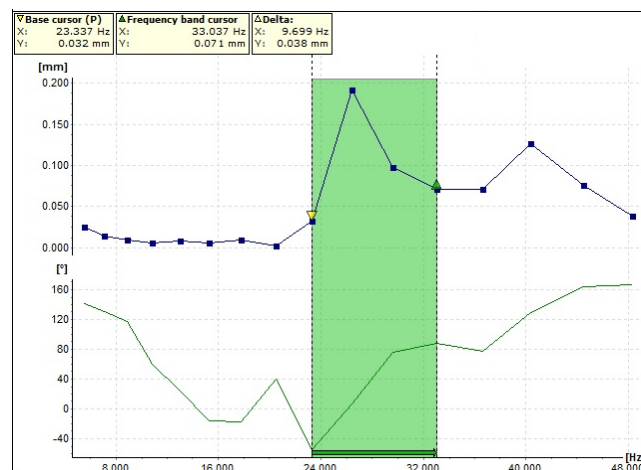
Celem pomiaru „wybiegu/rozbiegu” jest określenie obszaru rezonansu badanej maszyny poprzez pomiar amplitudy oraz kąta jej występowania w szerokim zakresie prędkości obrotowej. Obszar rezonansu jest niestabilny, ponieważ drgania w zakresie prędkości rezonansowej mogą gwałtownie narastać [6]. W przypadku gdy jest możliwość nastawiania prędkości obrotowej wyważanego „wirnika” zaleca się nastawienie prędkości obrotowej poza obszarem rezonansu.

Pomiar „wybiegu/rozbiegu” można przeprowadzać na dwa sposoby:

- wybieg – drgania są mierzone podczas zmniejszania obrotów,

- rozbieg – drgania są mierzone podczas zwiększania obrotów.

W ustawieniach pomiaru była możliwość zadania prędkości przy której pomiar miał się automatycznie rozpocząć oraz zakończyć. Do wykonania tego pomiaru był potrzebny czujnik przyspieszeń oraz czujnik prędkości obrotowej. Rys. 6 przedstawia wykres wybiegu niewyważonej szlifierki dwutarczowej. Wykres przedstawia zarówno amplitudę jak i fazę. Dla większego bezpieczeństwa obszar częstotliwości obrotowej zaznaczony na zielono powinien zostać pominięty podczas wyważania, jest to obszar rezonansu (od 23,337 Hz do 33,037 Hz). W przypadku szlifierki dwutarczowej nie ma możliwości nastawiania prędkości obrotowej przy której wyważanie będzie przeprowadzane znajduje się poza obszarem rezonansu – około 49 Hz.

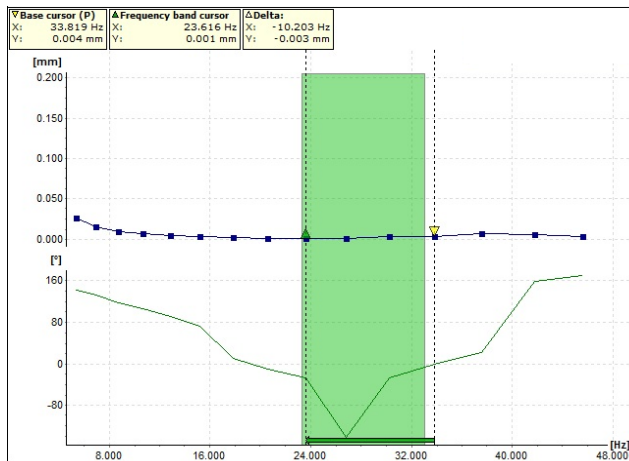


Rys. 4. Wykres wybiegu niewyważonej szlifierki dwutarczowej

Po prawidłowo przeprowadzonym procesie wyważania został wykonany ponownie pomiar wybiegu. Celem tego pomiaru było sprawdzenie czy zmniejszone niewyważenie wpłynęło pozytywnie na ograniczenie lub zniwelowanie występowania obszaru rezonansu.

Wykres pomiaru wybiegu po zakończonym procesie wyważania przedstawia rys. 7. Z porównania wykresów z rys. 6 i 7 jednoznacznie wynika, iż obszar rezonansu został zredukowany do prawie pomijalnego poziomu. Po wyważeniu nie można wyszczególnić obszaru częstotliwości obrotowej w której amplituda wzrastałaby w sposób znaczny. Maksymalna amplituda została zredukowana z wartości 0,191 mm do 0,026 mm. Wyniki testu wybiegu również po-

twierdzą prawidłowość przeprowadzenia wyważania oraz jego sensowność.



Rys. 5. Wykres wybiegu wyważonej szlifierki dwutarczowej

### Podsumowanie

Szlifierka dwutarczowa mimo niewielkich rozmiarów spełniła swoje zadanie w badaniach i analizie drgań. Dzięki zastąpieniu tarcz ściernych tarczami aluminiowymi rozszerzony został zakres zmienności obciążalności wrzeciennika. Dzięki temu poznano obszar możliwości modyfikacji ściernic, uzyskano następujące informacje, że:

- zjawisko niewyważenia można z powodzeniem mierzyć, następnie niwelować poprzez wprowadzanie mas korekcyjnych zmniejszających poziom drgań,
- zmniejszenie niewyważenia wirnika pozwala wyeliminować obszar rezonansu urządzenia,
- wyważania można dokonywać na różnym promieniu tarczy, wraz ze zmniejszaniem promienia wzrasta masa ciężarków korekcyjnych,
- dokładne określenie pozycji montażu oraz masy korekcyjnej przyspiesza proces wyważania,
- wykonywanie pomiarów drgań dla maszyny w odpowiednich obszarach czasowych pozwala na ocenę stopnia uszkodzenia łożyska oraz podjęcie decyzji o ich wymianie zanim dojdzie do uszkodzenia, zatrzymania urządzenia,
- parametry pomiarów należy dobierać pod kątem wyszukiwania konkretnych defektów, zwiększa to prawdopodobieństwo pomiaru obejmującego sygnał na temat danego problemu,
- pomiary powinny być wykonywane przy znanej oraz stałej prędkości obrotowej, pozwala to na ich późniejszą poprawną analizę,
- zachowanie w tego typu badaniach powtarzalnego systemu oznaczania pomiarów ogranicza liczbę błędów w trakcie ich rejestracji.

### LITERATURA

1. Barszcz T., Systemy monitorowania i diagnostyki maszyn, Instytut Technologii Eksploatacji PIB, Kraków 2006.
2. Norma DIN 913, PN – M 82314: Wkręty dociskowe z gniazdem sześciokątnym i końcem płaskim ściętym.
3. PN-ISO 10816-1:1998 Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących. Wytyczne ogólne.
4. Ickiewicz J.: Ćwiczenie nr 5: Wyważanie wirników sztywnych w łożyskach własnych. Dopuszczalne niewyważenie resztkowe. Politechnika Białostocka 2011.
5. PN-90/N-1358 Drgania. Metody pomiarów i oceny drgań maszyn.

6. Mosion D., Pawłowski W. Ćwiczenie D-1 „Obserwacja rozruchu wirujących zespołów napędowych obrabiarek” Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Łódź 2011.