

Tomasz WALA^{1*}
Krzysztof LIS¹

ANALIZA WPŁYWU PROCESU OBRÓBKI WYSOKOCIŚNIENIOWĄ STRUGĄ WODNO-ŚCIERNĄ NA DRGANIA MASZINY

Do tej pory obróbka wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną analizowana była głównie pod kątem wpływu drgań głowicy tnącej na jakość obrabianej powierzchni. Prezentowana praca jest kontynuacją dotychczasowych badań autorów nad wpływem parametrów obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na drgania głowicy tnącej. Zamieszczono wyniki analiz drgań głowicy tnącej, mierzonych wibrometrem podczas procesu obróbki strugą wodną, wykorzystując autorskie oprogramowanie realizujące transformaty Fouriera i Gabora. Analizy te pozwoliły na dokonanie szeregu spostrzeżeń, które mogą umożliwić identyfikację przyczyn drgań maszyny oraz pozwolić na wyznaczenie kierunków dalszych badań nad czynnikami bezpośrednio wpływającymi na jakość obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną.

1. WPROWADZENIE

Dzięki pomiarom oraz analizom drgań badanego obiektu możemy monitorować i diagnozować stan procesu oraz wykorzystywać dane pomiarowe w celu wpływania na charakterystykę jego pracy. Oznacza to, że zastosowanie analizy drgań obiektów może znacząco przyczynić się do poprawy funkcjonowania całej maszyny w zakresie procesu technologicznego.

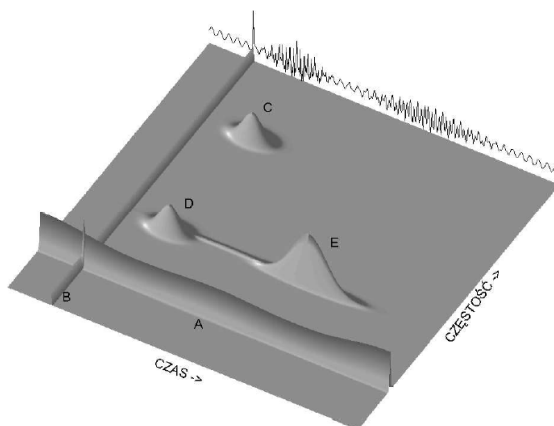
W ramach niniejszego artykułu w części eksperymentalnej zaprezentowano badania własne, pod kątem wpływu parametrów obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na drgania głowicy tnącej. Analizie zostały poddane wyniki pomiarów drgań głowicy, zarejestrowane podczas pracy maszyny dla różnych ustawień parametrów obróbczych tj. przy użyciu strugi wodno-ściernej dla stałego ciśnienia roboczego i zmiennego wydatku ścierniwa, a także przy użyciu czystej wody, dla różnych wartości ciśnienia roboczego. Zarówno podczas rejestracji jak i analizy otrzymanych wyników pomiaru drgań użyto autorskiego oprogramowania przygotowanego w środowisku LabView.

Analizę wyników pomiarów w dziedzinie częstotliwości przeprowadzono z zastosowaniem transformaty Fouriera, a dla analiz sygnałów niestacjonarnych posłużono

¹ Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn

* E-mail: tomasz.wala@polsl.pl

się transformatą Gabora, która jest specjalnym przypadkiem krótko-czasowej transformaty Fouriera. Używa się jej w celu określenia częstotliwości sygnału oraz jej zmienności w czasie (rys.1).



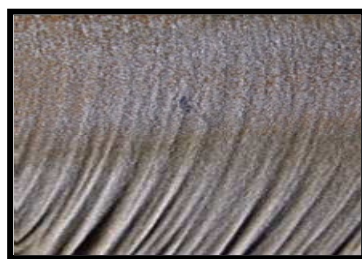
Rys.1. Rozkład gęstości energii sygnału w przestrzeni czas – częstotliwość [1]
Fig. 1. The power spectrum distribution of signal in space time – frequency [1]

W końcowej części artykułu przeprowadzona została dyskusja otrzymanych wyników oraz przedstawiono wnioski z niej wynikające.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Jedną z podstawowych cech charakteryzujących maszyny technologiczne jest dokładność obróbki. W dzisiejszych czasach gdy przedmioty, które wytwarzamy stają się coraz mniejsze i o coraz bardziej skomplikowanych kształtach, aspekt dokładności wydaje się być w naturalny sposób priorytetowy. Jednocześnie ważne staje się też to, aby wytworzenie takich przedmiotów nie było zbyt trudne i czasochłonne. Obróbka wodno-ścierna niemalże w stu procentach spełnia powyższe kryteria. Tworzenie skomplikowanych kształtów w łatwy, szybki i w miarę dokładny sposób to jedne z jej podstawowych cech.

Jednakże technologia ta boryka się z jednym podstawowym problemem, jakim jest jakość powierzchni powstałej po przecięciu przedmiotu. Gdy spojrzymy na powierzchnię uzyskaną po przejściu strugi wodno-ściernej, można zauważyć występowanie pewnego rodzaju falowania w postaci tzw. prążków (rys.2).



Rys. 2. Przykład powierzchni uzyskanej po cięciu strugą wodno-ścierną
Fig.2. The example of mached surface after the abrasive waterjet cutting

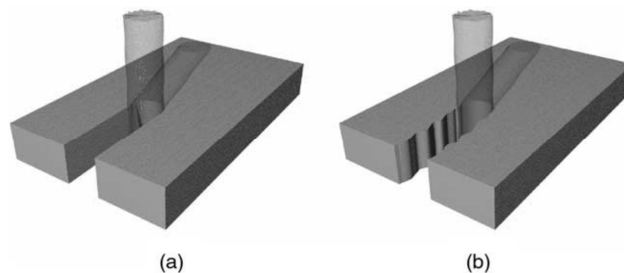
Jak pokazują dotychczasowe badania [3] jakość powierzchni zależy m.in. od drgań, które powstają w trakcie procesu cięcia. Te zaś spowodowane są między innymi niestabilnością parametrów procesu w trakcie pracy maszyny.

Drgania zachodzące podczas procesu cięcia strugą wodno-ścierną dzielą się na:

- egzogeniczne (zewnętrzne) – wywodzące się z oddziaływania strumienia wody i ścierniwa na obrabiany przedmiot oraz na powietrze i wodę, które znajdują się w przestrzeni roboczej,
- endogeniczne (wewnętrzne) – pochodzące od maszyny, głowicy tnącej, systemu ruchu, systemu wzmacniającego oraz dyszy.

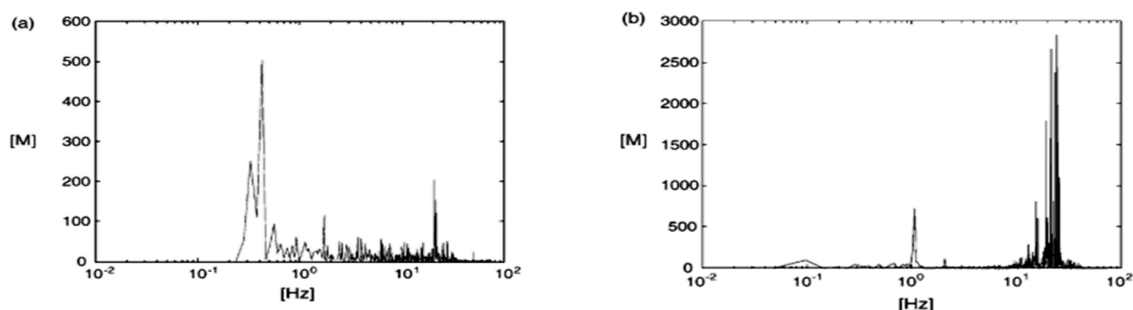
W celu zmniejszenia lub wyeliminowania drgań egzogennych stosuje się specjalne systemy mocowania przedmiotów obrabianych jak np. rusztowanie. Rusztowanie przede wszystkim zmniejsza występowanie takiego zjawiska jakim jest *splash-back*, powstającego na skutek zderzenia się strugi tnącej z wodą znajdującą się w basenie roboczym.

Badania zaprezentowane w artykule [3] wykazują, że powierzchnia po przejściu strugi tnącej charakteryzuje się występowaniem na niej prążków, których wymiar często odpowiada średnicy strugi tnącej, a częstotliwość ich występowania jest silnie zależna od drgań głowicy tnącej. Badania [2] potwierdziły natomiast, że przeważająca część drgań pochodzi od głowicy tnącej (rys 3). Przy zastosowaniu dyszy wodnej o większej średnicy wzrasta amplituda drgań, a ponadto wraz ze zużyciem dyszy oprócz amplitudy można również zaobserwować wzrost częstotliwości drgań.



Rys. 3. Przykłady cięcia: a) idealne przejście strugi tnącej; b) przejście strugi tnącej z założeniem przenoszenia drgań [2]

Fig. 3. Examples of cutting: (a) ideal, (b) with the assumption that the cutting head transfers its vibrations to the jet (b) [2]



Rys. 4. Analiza widmowa uzyskana przy użyciu nowej dyszy: a) $d_w = 0,20\text{mm}$,
b) $d_w = 0,30\text{mm}$ [2]

Fig. 4. Vibration power spectrum analysis for new water nozzle: (a) $d_w = 0,20\text{mm}$,
b) $d_w = 0,30\text{mm}$ [2]

W rzeczywistości, przy dużej prędkości (około 900m/s), spójną strugę można uznać za ciało sztywne. Założenie to pozwala przyjąć, że głowica przenosi drgania na strugę tnącą i odwrotnie. W związku z tym drgania pochodzące od strugi tnącej mogą powodować niestabilność głowicy, a w konsekwencji prowadzić do strat energii oraz spadku wydajności cięcia, co wpłynie na jakość przecinanych powierzchni.

Charakterystyki na rysunku 4 przedstawiają drgania głowicy tnącej w dziedzinie częstotliwości dla dwóch różnych średnic dyszy wodnej, uzyskane w pracy [2].

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W ramach badań zbudowano stanowisko do pomiarów oraz rejestracji drgań głowicy tnącej z zastosowaniem wibrometru laserowego. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku 5.

Stanowisko, które zostało użyte do rejestracji drgań głowicy tnącej składa się z następujących elementów:

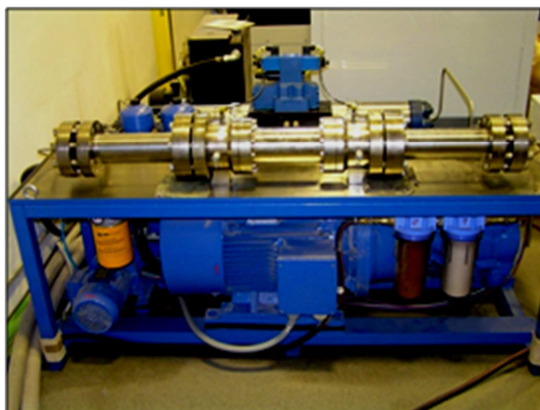
- głowica wodno-ścierna - obiekt badania,
- wibrometr laserowy PDV-100 firmy Polytec umieszczony na statywie,
- 16 bitowy przetwornik A/C,
- komputer PC wraz z oprogramowaniem do akwizycji danych.



Rys. 5. Schemat stanowiska do pomiaru i rejestracji drgań głowicy z zastosowaniem wibrometru laserowego
Fig. 5. The stand for vibration acquisition of cutter head by the laser vibrometer

Pomiar drgań był dokonywany za pomocą wibrometru laserowego zamontowanego na statywie. Wiązka pomiarowa lasera została skupiona na dyszy ściernej, na której w celu poprawy własności pomiarowych dla wibrometru laserowego, naklejono dedykowaną taśmę

refleksyjną. Pomiar prędkości drgań odbywał się w paśmie częstotliwości od 0 do 22kHz. A więc częstotliwość pracy przetwornika A/C wynosiła 44kHz. Pomiarzy były przeprowadzone dla różnych ustawień parametrów obróbki wodno-ściernej, tak aby była możliwość przeprowadzenia analizy wpływu parametrów obróbki na drgania głowicy tnącej.



Rys. 6. Pompa wysokociśnieniowa HP19/45-BASIC firmy UHDE
Fig. 6. The UHDE high-pressure pump HP19/45-BASIC

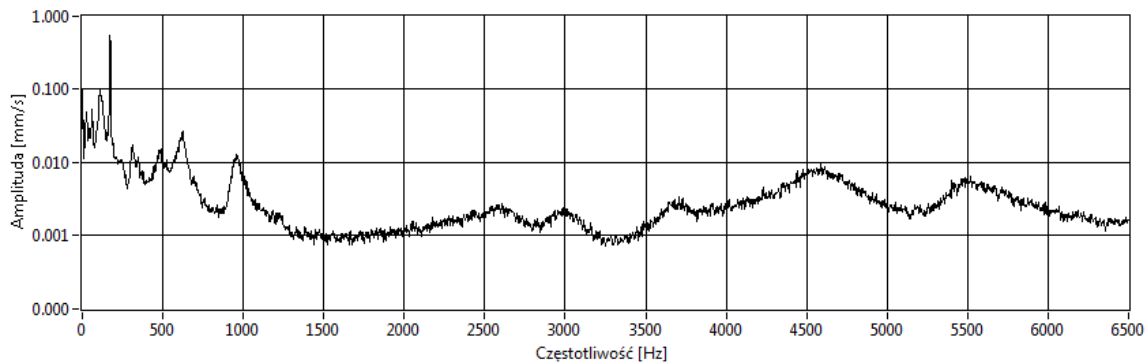
Na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 5 wykonane zostały pomiary drgań dyszy ścierniej głowicy tnącej, wykonanej z węgla wolframu. Dysza ta miała średnicę 1mm. Zastosowano też szafirową dyszę wodną o średnicy 0,35mm. Generatorem ciśnienia roboczego była pompa wysokociśnieniowa HP19/45-BASIC firmy UHDE (rys. 6).

4. ANALIZA DRGAŃ GŁOWICY TNĄCEJ NA PODSTAWIE WYNIKÓW OTRZYMANYCH Z BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W celu rejestracji oraz analizy drgań na podstawie otrzymanych danych pochodzących z pomiarów wibrometrem laserowym, zastosowano odpowiednie oprogramowanie komputerowe [4]. Oprogramowanie to zbudowane zostało w środowisku Labview. Za jego pomocą możliwa jest edycja danych pomiarowych w celu ich skalowania, filtrowania, całkowania itp. Umożliwia ono również w łatwy i szybki sposób generowanie wykresów drgań w dziedzinie czasu oraz charakterystyk w oparciu o transformatę Fouriera i transformatę Gabora.

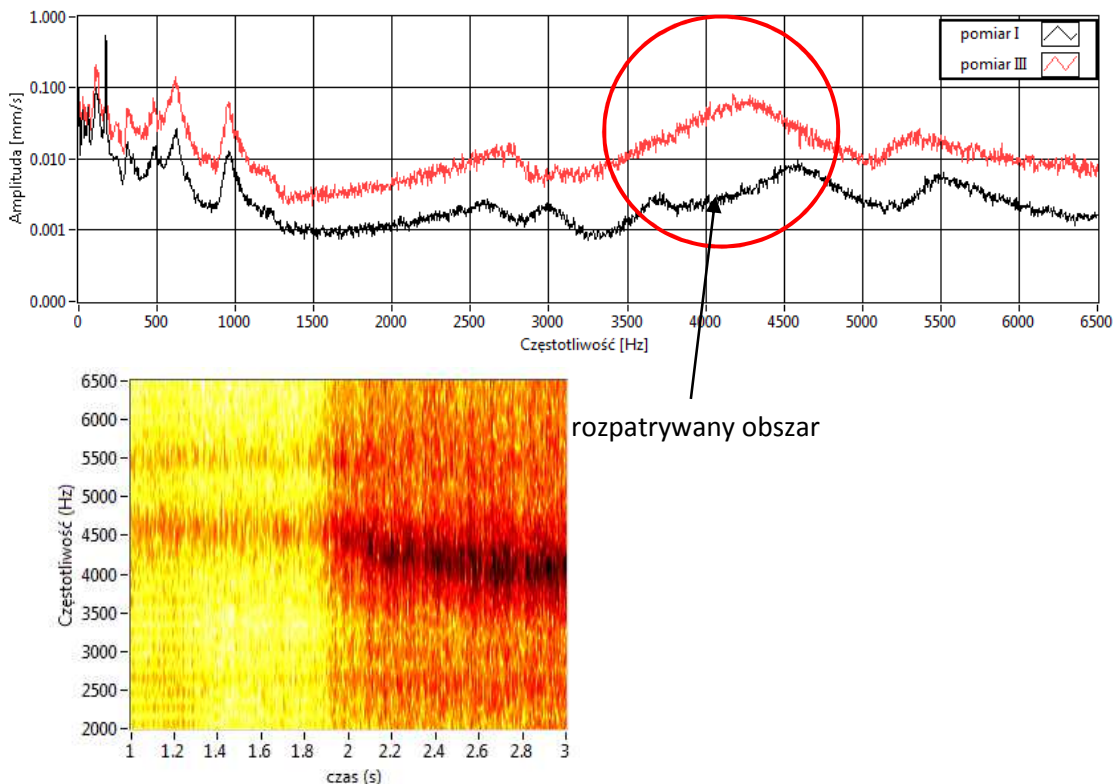
4.1. ANALIZA DRGAŃ Z PRZEDZIAŁU 1000-5000HZ

Podczas pracy maszyny Waterjet z wykorzystaniem samej wody o ciśnieniu 330MPa przy częstotliwościach w zakresie od 4400Hz do 4700Hz można zauważyć pojawianie się drgań o niewielkich amplitudach (rys. 7).



Rys. 7. Częstotliwości drgań wyznaczone w oparciu o transformację Fouriera dla strugi wodnej
 Fig. 7. Vibration frequency determined based on Fourier transform for the pure waterjet

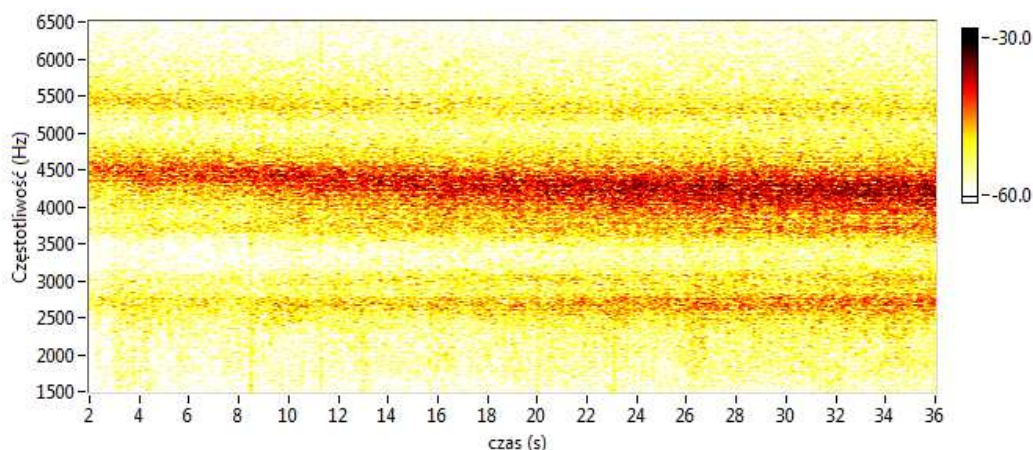
Gdy woda przepływająca przez dyszę ścierną została wzbogacona o ścierniwo, zauważono, że częstotliwości tych drgań zmalały do przedziału od 4200Hz do 4500Hz, a amplitudy tych drgań znacznie wzrosły. Szczególnie zaobserwować to można przy wydatku ścierniwa równym 340g/min (rys. 8), przy którym amplituda wzrasta prawie 10 krotnie w porównaniu z drganiami zaobserwowanymi przy pracy samą wodą dla ciśnienia roboczego 330MPa (od ok. 0,008mm/s do 0,07m/s) (rys. 8).



Rys. 8. Porównanie częstotliwości drgań wyznaczonych w oparciu o transformację Fouriera dla przepływu strugi czystej wody i strugi wodnej ze ścierniwem oraz rozkład Gabora ujmujący moment włączenia ścierniwa
 Fig. 8. The comparison of vibration frequency determined based on Fourier transform for the pure waterjet and abrasive waterjet and Gabor distribution showing existing the abrasive

Zaobserwowano, że wraz ze zmniejszaniem wydatku ścierniwa następuje zmniejszenie wartości amplitud tych drgań. Podczas dokonywania pomiaru wraz z narastającym ciśnieniem roboczym można zaobserwować, że amplitudy tych drgań w niewielkim stopniu, ale również rosną (rys. 9).

Przy analizie rozkładu Gabora dla wszystkich przypadków pomiarów można zaobserwować, iż wraz z upływającym czasem pracy głowicy drgania z przedziału częstotliwości od 4200Hz do 4500Hz maleją do częstotliwości z przedziału od 3700Hz do 4200Hz. Wynikać to może z faktu stabilizowania się natężenia przepływu strugi wodno-ścierniej, od momentu otwarcia zaworu uruchamiającego przepływ wody do głowicy tnącej.



Rys. 9. Częstotliwości drgań wyznaczone w oparciu o rozkład Gabora dla strugi wodno-ścierniej o w zakresie 3000-5500Hz

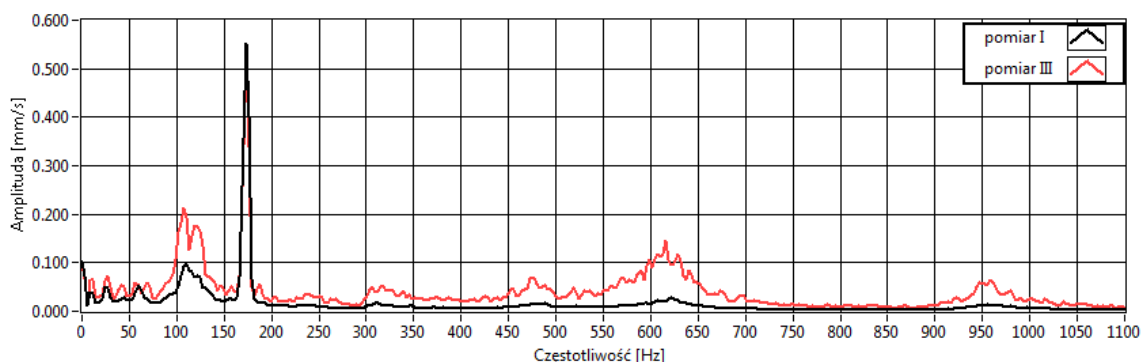
Fig. 9. Vibration frequency determined based on Gabor distribution for abrasive waterjet process at the range 3000-5500Hz

Można przypuszczać, że drgania o częstotliwościach z zakresu od 4200Hz do 4500Hz oraz ich zaobserwowana zmienność w zależności od parametrów obróbki, są drganiami o częstotliwościach drgań własnych dyszy ścierniej wraz z układem ją mocującym, które na skutek zwiększenia prędkości oraz zagęszczenia przepływającego medium wzbudzają się w większym stopniu. Należy tu również mieć na uwadze, że częstotliwość drgań własnych tej dyszy w głowicy tnącej w istotnym stopniu zależy od sztywności jej zamocowania. Ten wniosek wymaga jednak potwierdzenie w dalszych badaniach suportu narzędziowego (głowicy tnącej). Wyznacza to kierunki dalszych badań.

4.2. ANALIZA DRGAŃ Z PRZEDZIAŁU 0-1000HZ

Podobnie jak w przypadku drgań o częstotliwościach zbliżonych do 4300Hz można zaobserwować wzbudzenie się drgań na skutek dodania do wody ścierniwa przy częstotliwościach zbliżonych do 120Hz, 600Hz oraz 900Hz. Przedstawiają to wykresy zamieszczone na rys. 10. Częstotliwości drgań przedstawione na tym rysunku (struga

czystej wody – pomiar I) zostały zmierzone podczas przepływu strugi czystej wody przy ciśnieniu roboczym równym 330MPa. Częstotliwości drgań dla przepływu strugi wodnej ze ścierniwem (pomiar III) przedstawiono na rysunku 10, przy ciśnieniu roboczym równym 330MPa i wydatku ścierniwa 340g/min.



Rys. 10. Częstotliwości drgań wyznaczone w oparciu o transformatę Fouriera dla przepływu strugi czystej wody i strugi wodnej ze ścierniwem w zakresie 0-1100Hz

Fig. 10. Vibration frequency determined based on Fourier transform for the pure waterjet and the abrasive waterjet at the range 0-1100Hz

Mogą to być, ale nie muszą, trzy kolejne wartości częstości drgań własnych. Jest to kolejne stwierdzenie wyznaczający kierunek dalszych badań pod kątem pomiarów drgań głowicy tnącej.

4.3. ANALIZA DRGAŃ Z PRZEDZIAŁU 170 - 180HZ

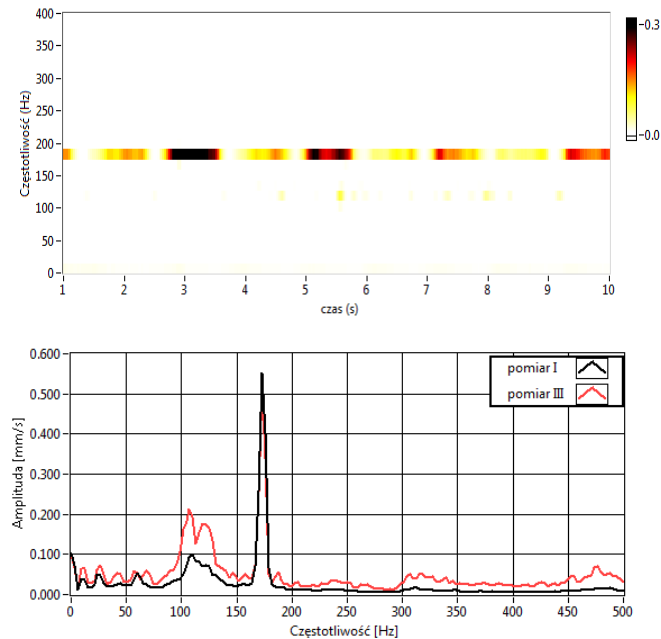
Istotne źródła drgań, jakie były rozpatrywane w zakresie częstotliwości od 170Hz do 180Hz to: drgania związane z pracą silnika asynchronicznego pompy wysokociśnieniowej, drgania związane z pracą multiplikatora pompy wysokociśnieniowej i drgania występujące z powodu innych możliwych czynników wpływających na pracę multiplikatora.

4.3.1. DRGANIA ZWIĄZANE Z PRACĄ SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO POMPY WYSOKOCIŚNIENIOWEJ

Sygnal pomiarowy pokazany na rysunku 11 przedstawia drgania o największych amplitudach, zaobserwowanych w badaniach z zastosowaniem wibrometru laserowego, których częstotliwości wynoszą około 174Hz. W tym przypadku wykres został opracowany dla wartości ciśnienia roboczego równego 330MPa. Ponadto amplituda drgań dla tej częstotliwości jest niezależna od tego, czy podawane jest ścierniwo czy nie (rys. 11).

Przy interpretacji drgań występujących dla częstości 174Hz należy zwrócić uwagę, że silnik napędzający pompę hydrauliczną jest silnikiem asynchronicznym o dwóch parach biegunów, a jego znamionowa prędkość obrotowa wynosi 1480obr/min co odpowiada 24.(6) obr/s. Jednocześnie wiadomo, że pompa hydrauliczna, która pompuje olej do

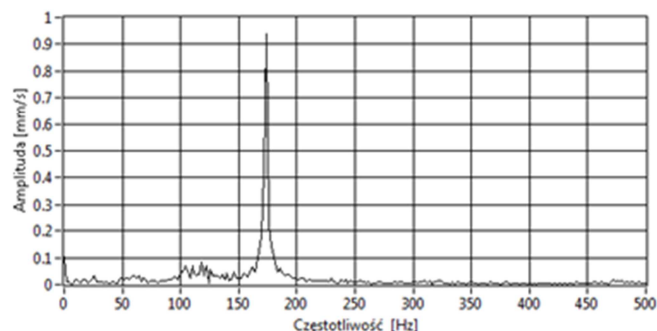
multiplikatora jest pompą tłoczkową z siedmioma tłoczkami, co po pomnożeniu przez ilości obrotów silnika na sekundę daje częstotliwość około 172Hz. Jest to podstawą do przyjęcia założenia, że powstawanie tych drgań jest wynikiem charakterystyki pracy pompy wysokociśnieniowej.



Rys. 11. Częstotliwości drgań wyznaczone w oparciu o transformatę Fouriera dla przepływu strugi czystej wody i strugi wodnej ze ścierniwem oraz rozkład Gabora w zakresie 0-500Hz

Fig. 11. Vibration frequency determined based on Fourier transform for the pure waterjet and abrasive waterjet and Gabor distribution at the range 0-500 Hz

Analizując wyniki pomiarów stwierdzono, że amplitudy drgań dla częstotliwości około 175Hz są największe ze wszystkich, zmierzonych w tych badaniach, drgań głowicy i sięgają prawie 1mm/s. Dobrze widoczne jest to na wykresie przedstawionym na rysunku 12, który pokazuje drgania w momencie występowania maksymalnej amplitudy dla częstotliwości około 175Hz.



Rys. 12. Częstotliwości drgań wyznaczone w oparciu o transformatę Fouriera dla strugi wodno-ścierniej w zakresie 0-500Hz

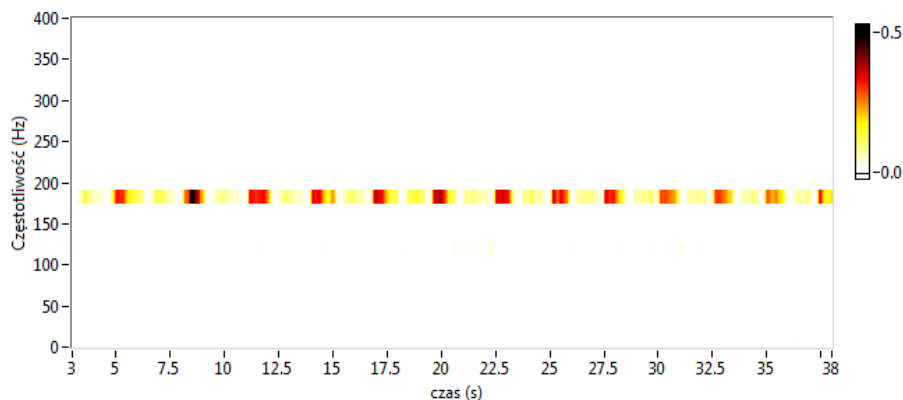
Fig. 12. Vibration frequency determined based on Fourier transform for the abrasive waterjet at the range 0-500HZ

Analizy kolejnych charakterystyk wyznaczonych z pomiarów pozwoliły wykazać, że wraz ze wzrostem wartości zadanej ciśnienia roboczego, częstotliwość drgań o najwyższych amplitudach spada z około 175Hz do 173Hz.

Spadek wartości częstotliwości tych drgań jest spowodowany zwiększeniem wydajności pompy, przez co zwiększa się opór stawiany przez pompę silnikowi, a to w następstwie powoduje wzrost wartości poślizgu i spadek prędkości obrotowej silnika. Gdy pompa generuje ciśnienie robocze 165MPa wartość częstotliwości drgań zawiera się pomiędzy 174-175Hz. Wskazuje to, że rzeczywista prędkość obrotowa silnika, dla zadanej wydajności pompy, wynosiła około 1495 obrotów na minutę, a to daje wartość poślizgu mniejszą od 0,5%. (Zasilanie silnika prądem o częstotliwość 50Hz, prowadzi do prędkości synchronicznej dwubiegunowego silnika równej 1500obr/min). Wraz ze wzrostem wartości zadanej ciśnienia roboczego aż do 330MPa częstotliwość tych drgań spada nawet do 173Hz, co odpowiada rzeczywistej prędkości obrotowej silnika 1480obr/min. Świadczy to o tym, że nastąpił wzrost poślizgu do 1,3%.

4.3.2. DRGANIA ZWIĄZANE Z PRACĄ MULTIPLIKATORA POMPY WYSOKOCIŚNIENIOWEJ

Na rozkładzie gęstości energii sygnału zamieszczonym na rysunku 13 można zauważyć, że dla drgań o częstotliwościach około 175Hz wraz ze wzrostem wartości zadanej ciśnienia roboczego, zwiększają się ich amplitudy.



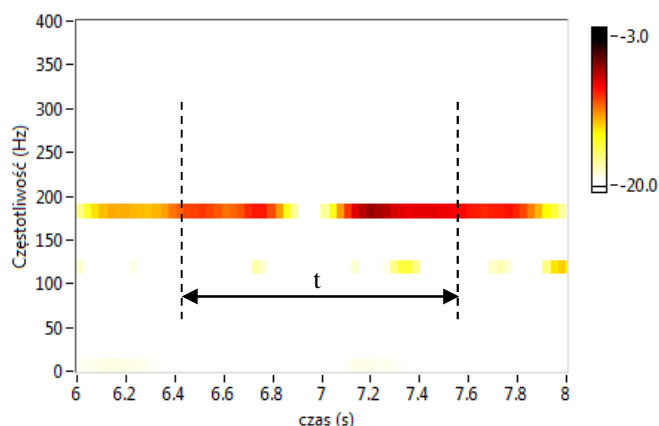
Rys. 13. Częstotliwości drgań wyznaczone w oparciu o rozkład Gabora dla przepływu strugi czystej wody w okolicy 175Hz

Fig. 13. Vibration frequency determined based on Gabor distribution the abrasive waterjet around 175Hz

Jednocześnie stwierdzono, że wraz ze wzrostem ciśnienia maleje odstęp czasowy pomiędzy szczytowymi wartościami amplitud tych drgań. Taki stan rzeczy pozwala wysunąć kolejny wniosek w odniesieniu do charakteru pracy multiplikatora.

Reprezentacja gęstości energii sygnału na rysunku 14 przedstawia przebieg zmiany wartości amplitud drgań głowicy tnącej dla wartości zadanej ciśnienia roboczego 330MPa podczas dwóch „tłoczeń” multiplikatora, tj. sprężania wody. Różnica pomiędzy szczytowymi wartościami amplitud jest równa odcinkowi czasu t (rys. 14), jaki jest

potrzebny dla przemieszczenia się tłoka multiplikatora z jednej pozycji krańcowej do drugiej. Czas ten wynosił 1,18 sekundy.



Rys. 14. Przebieg zmiany wartości amplitud drgań głowicy tnącej dla wartości zadanego ciśnienia roboczego 330MPa
Fig. 14. Changes of the amplitude of cutter head vibration for the preset operating pressure 330MPa

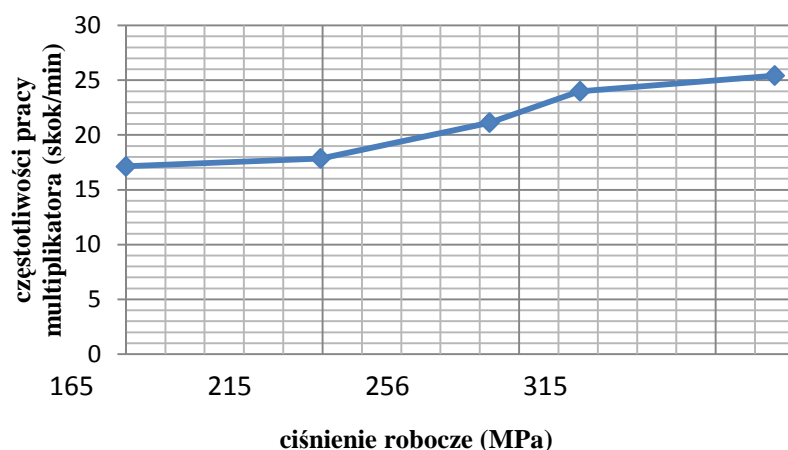
Z danych wyświetlanych na pulpicie sterowniczym użytkownika maszyny do obróbki wodno-ściernej wynika, że dla wartości ciśnienia roboczego wynoszącego 330MPa liczba skoków multiplikatora na minutę wynosi 25, co odpowiada 2,4 skoku tłoka na sekundę. Na skok tłoka multiplikatora składają się dwa tłoczenia, co oznacza, że jedno tłoczenie trwa 1,2s. Jest to wartość bardzo zbliżona do zmierzonego odstępu czasowego między szczytami amplitud, zaobserwowanymi w badaniach.

Analogiczne zbliżone wyniki dotyczą pozostałych wartości zadanych ciśnień roboczych. Zatem częstotliwość występowania szczytów amplitud oraz ich wartość silnie zależy od prędkości pracy multiplikatora. Dokonując szczegółowej analizy tych odstępów, w zależności od wartości zadanej ciśnienia roboczego, wyznaczono czasy przemieszczania się tłoka, a wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Czas przemieszczenia tłoka (czas sprężania wody w jednym kierunku) w zależności od ciśnienia
Table 1. Piston displacement time (compression time of water in one direction) depending on the pressure

Ciśnienie [MPa]	Czas przemieszczenia tłoka [s]
165,0	1,75
214,5	1,68
257,5	1,42
280,5	1,25
330,0	1,18

Wykres z rysunku 15 przedstawia zależność między wartością zadaną ciśnienia roboczego, a liczbą skoków multiplikatora wysokiego ciśnienia w ciągu minuty. Wykres został zbudowany w oparciu o dane pochodzące z analizy wykresów drgań głowicy tnącej dla narastającego ciśnienia roboczego.

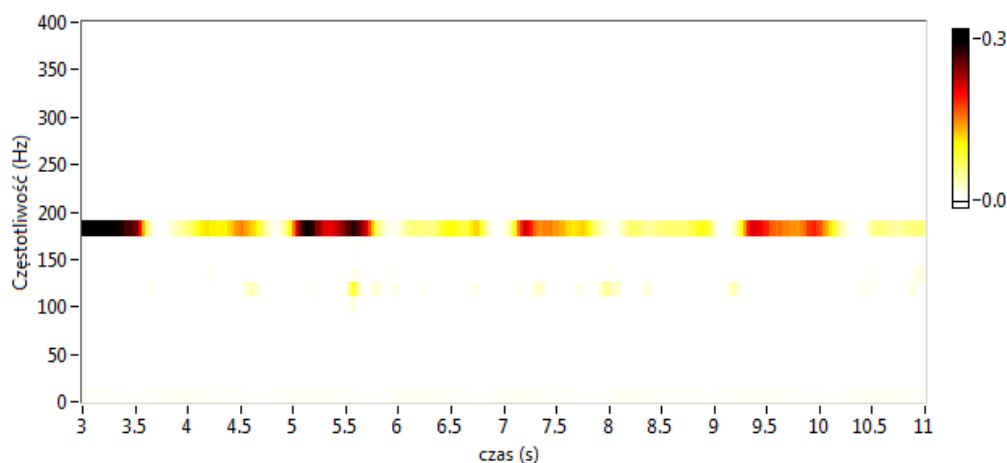


Rys. 15. Zależność częstotliwości pracy multiplikatora wysokiego ciśnienia (skok/min) od wartości zadanego ciśnienia roboczego

Fig. 15. The dependence of frequency of high pressure multiplier (stroke/min) from the preset operating pressure

4.3.3. DRGANIA ZWIĄZANE Z INNYMI MOŻLIWYMI CZYNNIKAMI WPŁYWAJĄCYMI NA PRACĘ MULTIPLIKATORA POMPY WYSOKOCIŚNIENIOWEJ

Zauważono również to, że szczytowe wartości amplitud dla stałego ciśnienia roboczego, na zmianę, są raz mniejsze raz większe. Dobrze obrazuje to wykres znajdujący się na rysunku 16. Przedstawia on drgania z zakresu ok. 175Hz podczas przepływu strugi czystej wody o ciśnieniu roboczym 330MPa.



Rys. 16. Częstotliwości drgań wyznaczone w oparciu o tranformatę Gabora w zakresie 0-500Hz

Fig. 16. Vibration frequency determined based on Gabor distribution at the range 0-500Hz

W celu wyjaśnienia dlaczego, podczas pracy multiplikatora w jednym kierunku, występują drgania o większej amplitudzie niż w kierunku przeciwnym, należałoby przeprowadzić szczegółowe badania pracy całego układu pompy wysokociśnieniowej, a w szczególności badania pod kątem:

- występowania przecieków,
- poprawności działania zaworów zwrotnych i czujników ciśnienia,
- występowania strat hydraulicznych spowodowanych np. różną długością przewodów odprowadzających strumień wody na końcach multiplikatora oraz doprowadzających olej pod ciśnieniem do każdej ze stron.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Poniżej zawarto najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz.

- Wraz ze zwiększeniem wydatku ścierniwa drgania dyszy ścierniej głowicy tnącej o częstotliwościach ok. 120Hz, ok. 600Hz, ok. 900Hz oraz 4300Hz znacznie zwiększają swoje amplitudy. Przyczyną tych drgań może być fakt iż są to częstotliwości odpowiadające drganiom własnym głowicy tnącej. Jednakże, aby to potwierdzić należałoby przeprowadzić badania głowicy tnącej pod kątem drgań własnych. Prędkości tych drgań nie przekraczają 0,2mm/s.
- Drgania o największych amplitudach, zaobserwowane podczas przeprowadzonych badań za pomocą wibrometru laserowego, występują przy częstotliwościach około 175Hz.
- Częstotliwość ok. 175Hz odpowiada częstotliwości pracy pompy wysokociśnieniowej i ma tendencję obniżania się na skutek zwiększenia wydajności pompy. Jest to spowodowane zwiększeniem się obciążenia silnika asynchronicznego, a co za tym idzie, zwiększeniem poślizgu.
- Wartości amplitud drgań oraz okres pomiędzy ich maksymalnymi wartościami dla częstotliwości ok. 175Hz silnie zależą od prędkości pracy multiplikatora wysokiego ciśnienia. Wraz ze wzrostem wartości zadanego ciśnienia roboczego wzrastają amplitudy tych drgań, a okres między maksymalnymi wartościami maleje. Jednocześnie stwierdzono, że w zależności od kierunku pracy multiplikatora wysokiego ciśnienia wartości maksymalnych amplitud tych drgań różnią się od siebie. Na tym etapie badań nie można było określić przyczyn tych różnic. Można przypuszczać, że są to np. przecieki, straty hydrauliczne lub po prostu fakt, iż bardzo trudno jest skonstruować urządzenie mechaniczne, które dla dowolnego kierunku swojej pracy wykazuje identyczne parametry dynamiczne. Znajomość przyczyn powodujących różnice amplitud maksymalnych można by wykorzystać np. w diagnozowaniu stanu zużycia elementów pompy wysokociśnieniowej.

W ramach przeprowadzonych badań zmierzono częstotliwości drgań, które bezpośrednio zależały od zadanego ciśnienia roboczego oraz ilości wydatku ścierniwa. Wnioski, które przedstawiono powyżej otwierają drogę do kolejnych badań dotyczących obróbki wodno-ścierniej, w celu jej dalszej optymalizacji z punktu widzenia jakości obrabianej powierzchni. Należy zaznaczyć, że analiza drgań głowicy tnącej pozwoliła wstępnie przeprowadzić monitoring pracy pompy wysokociśnieniowej, a w tym śledzić pracę silnika elektrycznego, pompy hydraulicznej i multiplikatora wysokiego ciśnienia w zależności od zadanych parametrów. Jest to pierwszy etap prac nad diagnostyką stanu

maszyny do obróbki wodno-ściernej w trakcie jej pracy, opartą na pomiarach drgań głowicy tnącej.

LITERATURA

- [1] DURKA P.J., 2007, *Matching pursuit and identification in EEG analysis*, Artech House engineering in medicine & biology series, Artech House.
- [2] MONNO M., RAVASIO C., 2005, *The effect of cutting head vibrations on the surfaces generated by waterjet cutting*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45/3, March 2005, 355–363.
- [3] GUO N.S., LOUIS H., MEIER G., 1993, *Surface structure and kerf geometry in abrasive waterjet cutting: formation and optimization*, Seventh American Water Jet Conference Seattle, Washington, 28–31 August, 1–25.
- [4] SOKOŁOWSKI A., LIS K., 2009, *Zintegrowany system do badań obrabiarek w warunkach przemysłowych - wybrane tory pomiarowe*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, 1, Politechnika Śląska, 39–58.

THE INFLUENCE OF ABRASIVE WATERJET MACHINING ON MACHINE VIBRATIONS

Until now, the abrasive waterjet machining has mainly been analyzed in terms of the influence of the cutter head vibration on the quality of the machined surface. This work is a continuation of previous studies, a summary of current developments in this field, while expanding them with an analysis of the factors that may cause these vibrations. Based on experimental data, the analysis was performed, which opens new possibilities to continue studies on the factors directly affecting the quality of abrasive waterjet machining.

Keywords: *abrasive waterjet machining, vibrations, digital vibrometer*