

Identyfikacja częstotliwości i postaci drgań maszyny AWJ w aspekcie drgań głowicy

Identification of the vibration frequency and form of the AWJ machine in aspect of cutter head vibration

TOMASZ WALA
KRZYSZTOF LIS*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.133>
English version available on: www.mechanik.media.pl

W ramach kompleksowych badań dotyczących wpływu drgań na proces cięcia wodno-ściernego AWJ (*abrasive water jet*) artykuł podejmuje temat identyfikacji własności modalnych maszyny z uwzględnieniem głowicy wodno-ściernej. Przeprowadzono eksperymentalną analizę modalną głównych podzespołów bramowej konstrukcji maszyny, tj. belki nośnej wraz z suportem narzędziowym i głowicą tnącą. Wyznaczenie własności modalnych maszyny pozwoliło na identyfikację tych drgań, które bezpośrednio wynikają z konstrukcji maszyny, oraz wskazanie ich w sygnale zarejestrowanym podczas cięcia.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka wodno-ścierna, test impulsowy, częstotliwości, postaci drgań

As part of a comprehensive study of influence of vibrations on the abrasive waterjet process, this article discusses about the identification of modal properties of the waterjet machine including the cutter head. The experimental modal analysis of the main gantry components of the machine construction was carried out, i.e. the carrier beam with the tool support and the cutter head. Determination of the modal properties of the machine allowed the identification of these vibrations, which are directly attributable to the construction of the machine and indicate them in the signal registered during the cutting.

KEYWORDS: *abrasive waterjet, impulse test, vibration frequencies, vibrations forms*

Podstawową drogą do wzrostu wydajności cięcia w metodzie obróbki wodno-ściernej jest przyspieszenie procesu poprzez zwiększenie jego parametrów, głównie ciśnienia i prędkości cięcia. Wzrost tych parametrów wiąże się jednak z większymi obciążeniami dynamicznymi oddziałującymi na maszynę. Wskutek tego mogą powstawać niepożądane drgania, które zmniejszają dokładność obróbki i jakość cięcia. Dlatego jednym z nadrzędnych celów badań prowadzonych w tym zakresie jest analiza własności dynamicznych (parametrów modalnych) konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego maszyny do cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, prowadząca do ujawnienia przyczyn powstawania drgań oraz ich wpływu na sam proces.

Obecny stan wiedzy na temat oceny jakości procesu na podstawie analizy drgań opiera się głównie na pomiarze i analizie drgań bezpośrednio w trakcie procesu [1, 2]. Towarzyszące procesowi cięcia drgania – ich częstotliwość i amplituda – w dużym stopniu zależą od parametrów cięcia i grubości przedmiotu obrabianego. Również średnica

strugi tnącej ma duży wpływ na postaci drgań – wraz ze wzrostem średnicy strugi ekstremum gęstości widmowej mocy przenosi się w kierunku niższych częstotliwości [4]. Parametry geometryczne powierzchni powstałej wskutek przecięcia istotnie zależą od ruchu i kąta nachylenia głowicy tnącej. Zarejestrowane sygnały drgań [5, 6], mierzone na głowicy tnącej, ujawniły silną korelację z harmonicznymi widmami mocy profili chropowatości powierzchni cięcia.

Autorzy badań przedstawionych w artykule [7] zwrócili uwagę, że redukcja drgań wyraźnie poprawia jakość powierzchni uzyskanej w procesie cięcia strugą wysokociśnieniową. O tej jakości decyduje kilka warunków zewnętrznych – np. oddziaływanie strugi z oprzyrządowaniem i wanną maszyny – oraz warunków wewnętrznych – np. charakter pracy pompy wysokociśnieniowej i systemu ruchu [1]. Do wzrostu nierównomierności na powierzchni przecięcia przyczynia się także różna prędkość cząstek ściernych, obserwowana na wysokości cięcia oraz w poprzecznym przekroju strugi tnącej. Autorzy badań [8, 9] potwierdzili również, że metoda rejestracji dźwięku w szerokim paśmie częstotliwości pozwala na obserwację zmian masy strugi, w której różna wartość energii kinetycznej przyczynia się zmian struktury pofalowania powierzchni przeciętej.

Ujawnione w badaniach [3] zakresy częstotliwości zależą od parametrów procesu, jednak zaobserwowano takie częstotliwości, przy których następuje znaczny wzrost amplitudy drgań dla określonych częstotliwości wymuszających, nawet gdy okresowe siły wymuszające są niewielkie.

Znajomość takich parametrów, jak postaci drgań, ich częstotliwości oraz współczynniki tłumienia, pozwala przewidzieć zachowanie się badanego obiektu pod wpływem warunków zewnętrznych.

W eksperymentalnej analizie modalnej wyróżnia się dwie podstawowe metody: metodę częstotliwościową i metodę impulsową. Różnią się one przede wszystkim sposobem wymuszenia drgań badanego układu. W metodzie częstotliwościowej układem wymuszającym drgania jest wzbudnik drgań, a w metodzie impulsowej drgania wymuszone są impulsowym sygnałem wywołanym tzw. młotkiem modalnym.

W badaniach wykorzystano metodę testu impulsowego, polegającą na wywołaniu krótkotrwałego sygnału o dużej amplitudzie. Kształt przebiegu sygnału, czas jego trwania i amplituda determinują zakres widma wymuszenia, na który można wpływać twardością końcówki młotka – w prezentowanych badaniach zastosowano końcówkę ograniczającą pasmo wymuszenia do kilkuset Hz. Metoda impulsowa jest łatwiejsza w zastosowaniu, ponieważ nie wymaga specjalnego wzbudnika drgań.

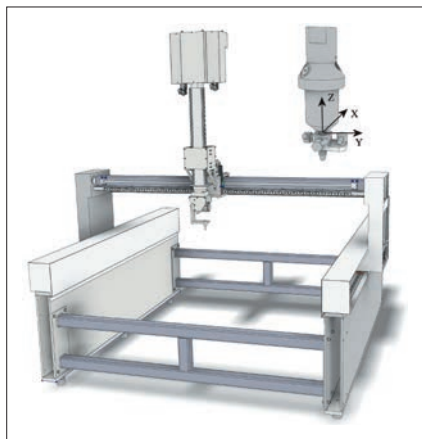
* Dr inż. Tomasz Wala (tomasz.wala@polsl.pl), dr inż. Krzysztof Lis (krzysztof.lis@polsl.pl) – Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn

Stanowisko badawcze

W celu przeprowadzenia eksperymentalnej analizy modalnej metodą testu impulsowego dla konkretnego układu maszyny zbudowano tor pomiarowy z wykorzystaniem:

- 3 akceleratory piezoelektrycznych (dla każdej osi przesuwu głowicy we wzajemnie prostopadłych kierunkach) typu 4326-A firmy Brüel & Kjær,
- młotka modalnego typu 8202 firmy Brüel & Kjær,
- komputera firmy National Instruments z kartą typu PXI 4472B i oprogramowaniem LabView.

Schemat poglądowy konstrukcji nośnej badanej maszyny typu Waterjet Waricut HWM-P1520/1-3D firmy Ridder przedstawiono na rys. 1.

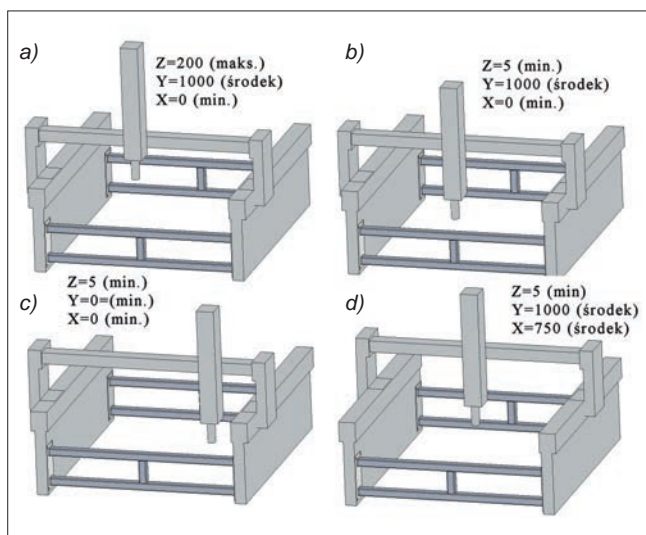


Rys. 1. Model ramy nośnej maszyny HWM-P1520/1-3D oraz sposób mocowania akcelerometrów piezoelektrycznych wraz z przyjętym układem współrzędnych (zgodnym z osiami maszyny)

Na końcówce głowicy tnącej zaprojektowano prosty przyrząd mocujący 3 akceleratory ustawione w kierunkach X, Y i Z (rys. 1). Analizy przeprowadzono za pomocą oprogramowania „System do badań obrabiarek w warunkach przemysłowych”, opracowanego w Katedrze Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej [10].

Rozmieszczenie czujników pozwoliło na przeprowadzenie analizy modalnej z wędrującym źródłem wzbudzenia. Analizowano 2 kierunki wymuszenia związane z płaszczyzną stołu maszyny – X i Y. Oś Z nie ma bezpośrednio wpływu na dokładność typowej obróbki 2D.

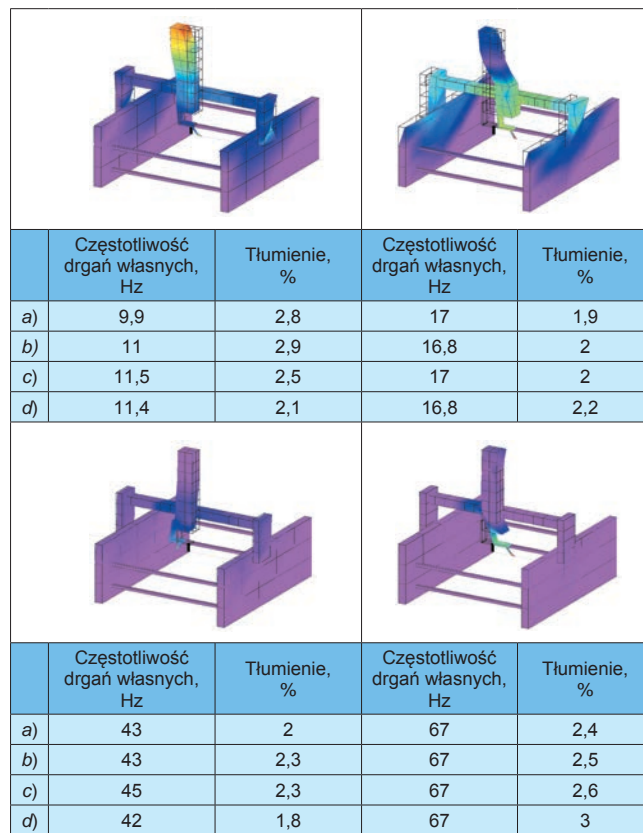
Badania wykonywano dla kilku pozycji maszyny. Obejmowały one 2 różne wysunięcia suwaka – osi Z – oraz różne położenia głowicy względem stołu – osi X i Y (rys. 2).



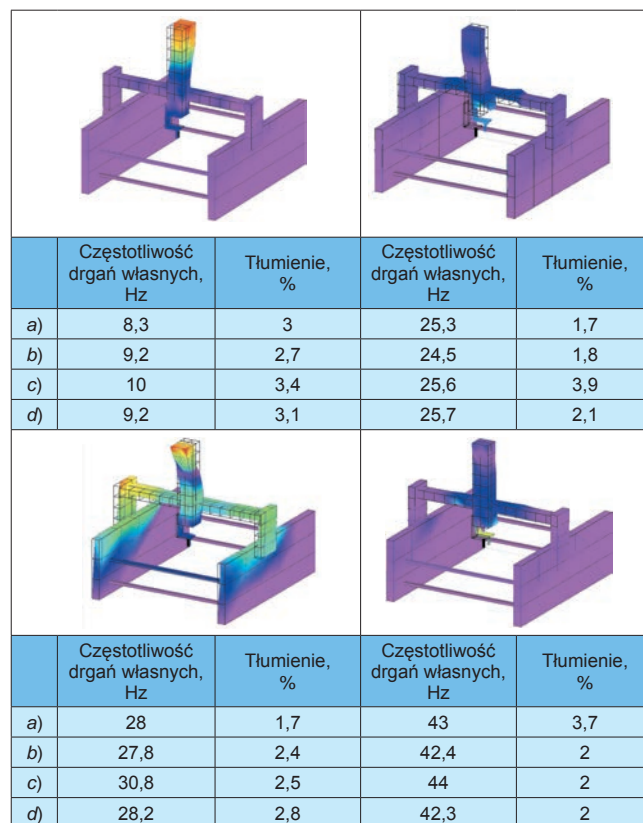
Rys. 2. Położenia osi, dla których przeprowadzono badania modalne

Wyniki badań

Przykładowe wyniki analizy modalnej dla 4 wariantów położenia osi przedstawiono na rys. 3 i 4.



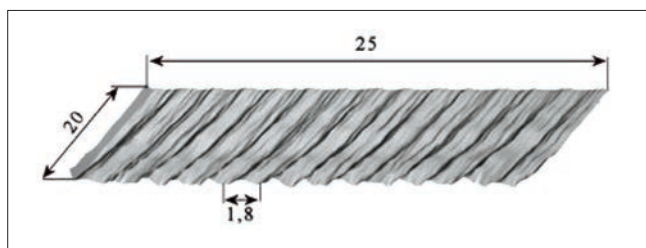
Rys. 3. Zestawienie parametrów drganiowych struktury nośnej maszyny w kierunku X dla poszczególnych położenia osi (według rys. 2)



Rys. 4. Zestawienie parametrów drganiowych struktury nośnej maszyny w kierunku Y dla poszczególnych położenia osi (według rys. 2)

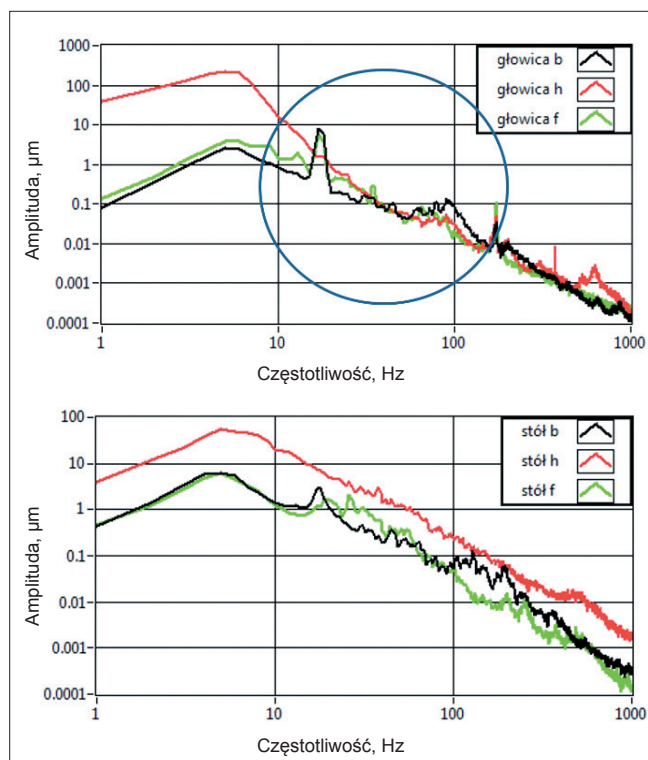
Pierwsze częstotliwości drgań własnych maszyny są stosunkowo niewielkie – ok. 10 Hz. Wartości te w małym stopniu zależą od położenia osi, przy czym ta zależność jest logiczna. Obniżenie kolumny (oś Z) – konfiguracja b) – zmniejsza pierwszą częstotliwość drgań kolumny oraz głowicy w stosunku do konfiguracji a). Odsunięcie bramy w pozycję środkową – konfiguracja d) – obniża praktycznie wszystkie częstotliwości drgań w stosunku do konfiguracji a).

Falistość powierzchni, uwydatniająca się zazwyczaj podczas cięcia materiałów jednorodnych z zastosowaniem dużych posuwów, mogłaby mieć genezę w drganiach własnych maszyny. Na rys. 5 przedstawiono wyniki profilu falistości powierzchni po cięciu z zastosowaniem prędkości posuwowej 90 mm/min (1,5 mm/s) próbki ze stali węglowej S235RJ o grubości 20 mm.



Rys. 5. Wyniki pomiarów profilu powierzchni stali o grubości 20 mm po cięciu z prędkością 90 mm/min

Z badań wynika, że średni odstęp falistości powierzchni wynosi 1,8 mm, a jej amplituda jest największa przy wyjściu strugi tnącej z materiału. Badania przeprowadzone tak, aby wymusić falistość powierzchni, wskazują, że gdyby przyczyną falistości były drgania własne, to ich częstotliwość nie przekraczałaby 1,2 Hz.



Rys. 6. Wartości amplitudy przemieszczeń w dziedzinie częstotliwości dla 3 składowych głowicy oraz stołu (posuw: 137 mm/min, materiał: S235RJ, grubość: 20 mm) [11]. Kolory określają kierunek pomiaru drgań, przy czym: b oznacza pomiar drgań w kierunku prostopadłym do powierzchni przecięcia (kierunku posuwu głowicy tnącej), h – pomiar drgań w kierunku osi strugi tnącej prostopadłej do powierzchni przedmiotu, f – pomiar drgań w kierunku posuwu głowicy tnącej

Odnosząc te wyniki do wyników przedstawionych w artykule [11], można dokonać ich interpretacji w kontekście wpływu drgań modalnych całej maszyny na drgania głowicy, rejestrowane podczas procesu cięcia.

Na rys. 6 zaprezentowano przykład widma dla drgań głowicy tnącej i stołu. Widma amplitudowe przedstawiono w jednostkach przemieszczenia.

Z wykresów wynika, że zidentyfikowane w ramach badań drgania własne ramy nośnej maszyny mają wpływ na sygnał zarejestrowany podczas pracy maszyny, co widać zwłaszcza na obszarze zaznaczonym na rys. 6. Jedną z częstotliwości (17 Hz) jest dominująca, a związane z nią przemieszczenia, występujące podczas cięcia, wynoszą maksymalnie 10 μm. Pozostałe postacie drgań mają znacznie mniejszy wpływ na drgania głowicy. Drgania stołu (rys. 6 – czujniki umieszczono na przedmiocie) nie znalazły odzwierciedlenia w drganiach ramy maszyny, co wydaje się logiczne, biorąc pod uwagę mechaniczne odseparowanie stołu i wanny od konstrukcji nośnej.

Podsumowanie

Przeprowadzona eksperymentalna analiza modalna konstrukcji nośnej przykładowej maszyny 5-osiowej do AWJ, mającej parametry użytkowe porównywalne z produktami konkurencyjnymi, umożliwiła poznanie cech tego typu maszyn. Dość niskie częstotliwości drgań własnych maszyny wynikają z jej charakterystycznej konstrukcji. Z jednej strony podczas pracy maszyna nie jest obciążona dużymi siłami (co wykazano już we wcześniejszych badaniach [12]), a z drugiej strony duże prędkości posuwowe (dochodzące do 20 m/min) i przyspieszenia powodują obciążenie konstrukcji sporymi siłami bezwładności. Wykazano również, że podatność dynamiczna dla 10 Hz wynosi ok. 0,7 mm/N.

LITERATURA

1. Monno M., Ravasio C. "The effect of cutting head vibrations on the surfaces generated by waterjet cutting". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 45, 3 (2005): s. 355–363.
2. Percel V., Hreha P., Hloch S., Tozan H., Valicek J. "Vibration emission as a potential source of information for abrasive waterjet quality process control". *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 61 (2012): s. 285–294.
3. Crawford F.C. „Fale”. Warszawa: PWN, 1973.
4. Gou N.S., Louis H., Meier G. "Surface structure and kerf geometry in abrasive waterjet cutting: formation and optimization". *7th American Water Jet Conference Seattle, Washington, 28–31 August (1993)*, s. 1–25.
5. Chao J., Geskin E.S., Chung Y. "Investigation of the dynamics of the surface topography formation during abrasive waterjet machining". *11th International Symposium on Jet Cutting Technology, St Andrews, Scotland, 8–10 September (1992)*, s. 593–603.
6. Chao J., Geskin E.S. "Experimental study of the striation formation and spectral analysis of the abrasive waterjet generated surfaces". *7th American Water Jet Conference, Seattle, Washington, 28–31 August, 1993*, s. 27–41.
7. Hreha P., Radvanska A., Hloch S., Perzel V., Królczyk G., Monkova K. "Determination of vibration frequency depending on abrasive mass flow rate during abrasive water jet cutting". *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 77 (2015): s. 763–774.
8. Momber A.W., Mohan R.S., Kovacovic R. "On-line analysis of hydro-abrasive erosion of pre-cracked materials by acoustic emission". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 31 (1999): s. 1–17.
9. Valíček J., Hloch S. "Using acoustic sound pressure level for quality prediction of surfaces created by abrasive waterjet". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 48, 1–4 (2010): s. 193–203, DOI: 10.1007/s00170-009-2277-3.
10. Sokółowski A., Lis K. „Zintegrowany system do badań obrabiarek w warunkach przemysłowych – wybrane tory pomiarowe”. *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn*. 1 (2009): s. 39–58.
11. Wala T., Lis K. „Pomiary drgań podczas procesu cięcia strugą wodno-ścierną pod kątem oceny jakości powierzchni”. *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1084–1085.
12. Wala T., Lis K. „Badanie oddziaływań siłowych podczas cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 415–423.