

PRZYKŁADY SPEKTROGRAMÓW JTFA ZAREJESTROWANYCH W WYBRANYCH WARUNKACH PRACY HOMOGENIZATORA CIŚNIENIOWEGO

Krzysztof ŁUKASIK

Wydział Mechaniczny, Katedra Obróbki Plastycznej
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, fax (81) 5381241

Streszczenie

W pracy przedstawiono spektrogramy wybranych przypadków zarejestrowanych podczas badań wibroakustycznych systemu zaworu homogenizatora wysokociśnieniowego. Zarejestrowane drgania przetworzono wykorzystując normalną i krótkoczasową transformatę Fouriera. Badania miały na celu rozpoznania jego charakterystyk wibracyjnych jednocześnie w dziedzinach czasu i częstotliwości (JTFA). Obserwowano zmiany spektrogramów w zależności od wybranych czynników i warunków pracy homogenizatorów.

Słowa kluczowe: analiza JTFA, diagnostyka wibracyjna, homogenizatory

A SAMPLE OF JTFA SPECTROGRAMS REGISTERED IN SELECTED OPERATING CONDITIONS OF PRESSURE HOMOGENIZERS

Summary

Sample vibration spectrograms of high pressure homogenizing valve system are presented in this paper. Registered vibrations were performed by normal and short time Fast Fourier transformation. The results - spectrograms were aimed at both recognizing their vibration characteristics in time and frequency domain simultaneously (JTFA). A spectrograms change in dependency of selected parameters and homogenisers operating conditions were observed.

Key words: JTFA analysis, vibration diagnosis, homogenizers

1. WSTĘP

Zastosowanie tradycyjnych metod analizy spektralnej bazujących na transformacji Fourierskiej umożliwia dobre opisanie przypadków w których generowany jest ciąg stacjonarnych lub pseudostacjonarnych sygnałów. Metoda ta nie daje bezpośredniej możliwości analizy procesów szybkozmiennych lub krótkotrwałych, co wynika z założenia, że przekształcany sygnał jest periodyczny i ma nieskończoną długość. Również analiza w wąskich pasmach charakterystycznych zakresów częstotliwości nie daje pewności, a często także i możliwości rozpoznania określonych zjawisk [1,4,5,6]. Ponadto wymaga stosowania złożonych filtrów pasmowych, jest czasochłonna, a w przypadku zmiany częstotliwości drgań w funkcji czasu jest najczęściej zawodna.

W praktyce spotyka się wiele przypadków wymagających obserwacji zmian sygnałów wibroakustycznych jednocześnie w dziedzinie czasu i częstotliwości. Drgania generowane podczas pracy homogenizatora ciśnieniowego w dużym stopniu są drganiami z określonymi i ustalonymi w czasie przedziałami zmienności ich intensywności. Jednakże zmienność warunków przepływowych wywołanych drganiami grzybka zaworu, pulsacjami ciśnienia niejednokrotnie prowadzi do generowania ciągów krótkotrwałych drgań, które w wielu

przypadkach związane mogą być ze zmianą częstotliwości. Istotny jest w tych przypadkach moment ich powstania jak i charakterystyka dalszej ewolucji. Szczególną przydatnością w badaniu takich przypadków charakteryzują się spektrogramy wyznaczone metodami JTFA.

2. KRÓTKIE PORÓWNANIE RÓŻNYCH METOD ANALIZY JTFA

Na przestrzeni ostatnich lat znacząco zostały udoskonalone sposoby badania złożonych sygnałów wibroakustycznych w połączonych dziedzinach czasu i częstotliwości określane jako analiza (JTFA – *Joint Tim-Frequency Analysis*). Aktualnie dostępnych jest szereg różnych metod analizy JTFA, których opisy podaje specjalistyczna literatura [2,3,8]. Każda z nich charakteryzuje się szeregiem zalet i wad, które predestynują ją w mniejszym lub większym stopniu do określonych zastosowań. Ogólną charakterystykę wybranych metod przedstawiono w tablicy 1. Wynika z niej, że przed wyborem metody wymagane jest przeprowadzenie porównania wymogów (dotyczących rozdzielczości i szybkości analizy) z jej możliwościami. Zastosowana w pracy metoda STFT (*Short Time Fast Fourier transformation*) charakteryzuje się największą szybkością przetwarzania, przy gorszej od pozostałych rozdzielczości. Jej zaletą jest

brak efektów skrośnych, które mogą w pewnych sytuacjach zmniejszać analizę przy użyciu pozostałych metod. Eliminacja tych efektów związana jest z koniecznością podejmowania

dotychczasowych działań w celu ich eliminacji. Problem ten w najmniejszym stopniu dotyczy rozwinięcia Gabora charakteryzującego się dobrą rozdzielnością przy mniejszej szybkości przetwarzania.

Tablica 1. Porównanie właściwości różnych metod analizy JTFA

Metoda	Algorytm	Rozdzielczość	Szybkość
STFT Spektrogram	Transformata Fouriera w lokalnym oknie	Zależna od wyboru okna. Dobra w dziedzinie czasu lub częstotliwości	Szybka
WVD (<i>Wigner-Ville Distribution</i>)	Globalny rozkład Wigner-Ville	Dobra rozdzielczość w dziedzinie czasu i częstotliwości	Szybka
GABOR Spektrogram	Rozwinięcie Gabora	Dobra rozdzielczość w dziedzinie czasu i częstotliwości	Średnia
CSD (<i>Cone-Shape distribution</i>)	Wygładzony rozkład Wigner-Ville	Dobra rozdzielczość w dziedzinie czasu i częstotliwości	Bardzo wolna

3. BADANIE WYBRANYCH PRZYPADKÓW PRACY HOMOGENIZATORA METODĄ JTFA.

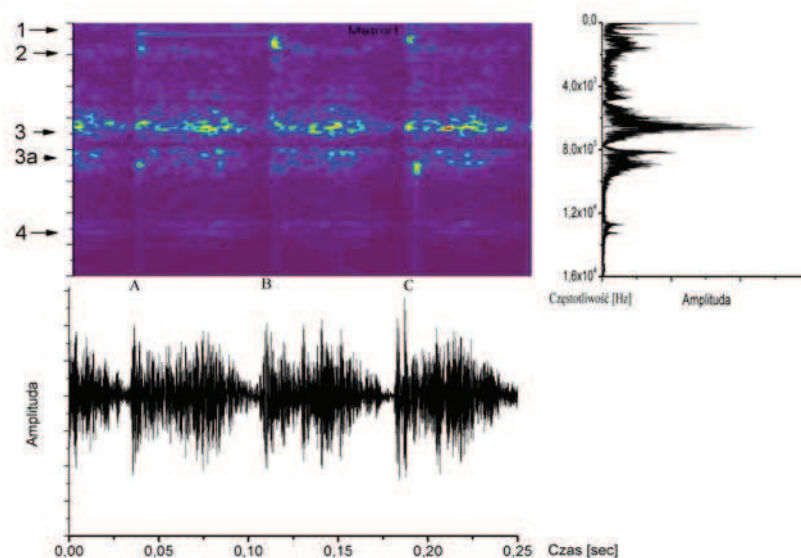
W celu otrzymania spektrogramów (JTFA) pracy homogenizatora ciśnieniowego zarejestrowano szereg drgań towarzyszących wybranym stanom zgodnie z opisaną w pracy [5] procedurą i poddano je przetworzeniu za pomocą dwóch różnych metod:

- normalnej FFT (*szybka transformata Fouriera*);
- metody STFT.

W przypadku pierwszej metody poddano obróbce całkowity sygnał zarejestrowany w czasie ok. 0,6 s, który pozwolił na uzyskanie typowego wykresu FFT pokazanego w prawej górnej części rys.1. Wykres ten daje ogólny pogląd o charakterystycznych częstotliwościach procesów wibracyjnych i ich intensywności. W przypadku

drugiej metody zarejestrowany ciąg drgań został podzielony na szereg wycinków czasowych (*okien*) o dobranej szerokości, które kolejno przetwarzano. Poszczególne wycinki czasowe poddawano obróbce (*Fourier transformation*), a wyniki zapisywano w postaci matrycy, której wiersze odpowiadają czasowi, a kolumny częstotliwości. Uzyskany w ten sposób spektrogram przedstawiono w lewej górnej części rys.1. Amplitudę drgań reprezentuje kolor. Możliwe jest także przedstawienie spektrogramu w układzie przestrzennym, bardziej plastycznym lecz jednocześnie mniej czytelnym.

W zależności od rodzaju przetwarzanego surowca, parametrów technologicznych pracy urządzenia (ciśnienia homogenizacji, ciśnienia zasilania, temperatury homogenizowanego medium), jego stanu technicznego obserwuje się określone zmiany w rejestrowanych spektrogramach.



Rys.1. Spektrogram pracy homogenizatora ciśnieniowego ($P_h=5MPa$) podczas homogenizacji soku z marchwi, przy wykorzystaniu zaworu stożkowego. W dolnej części przedstawiono nieobrobiony sygnał, w górnej prawej widmo Fouriera

W dolnej części rys.1. pokazano wykres nieprzetworzonego sygnału w identycznej skali czasu z pokazanym wyżej spektrogramem JTFA. Wzajemne relacje pomiędzy nimi pozwalają na śledzenie zmiany charakterystyk i kinetyki przebiegu rozpoznanych zjawisk. Widoczne na rysunku obszary oznaczone A,B,C odpowiadają momentom chwilowych zamknięć zaworu głównego spowodowanych spadkiem ciśnienia podawanego przez pompę medium, co przejawia się zanikiem wibracji w prawie całym zakresie rejestrowanych drgań na skutek zbliżenia grzybka zaworu do jego gniazda. Czasami obserwuje się bezpośredni kontakt elementów, co jest przejawem szczególnie niebezpiecznych stanów pracy urządzenia. Wyróżnione na rys.1 punkty oznaczone liczbowo odpowiadają częstotliwościom drgań ruchomych elementów homogenizatora, jak również są wynikiem procesów przepływowych.

Linia 1 związana jest z drganiami grzybków zaworów rozdzielających i na przedstawionym spektrogramie obserwuje się drganie jednego z grzybków w całym okresie jego uchylania, co świadczy o niewłaściwym doborze charakterystyki sprężyny podpierającej, lub zbyt dużym luzie poprzecznym w układzie prowadzenia zaworu [8].

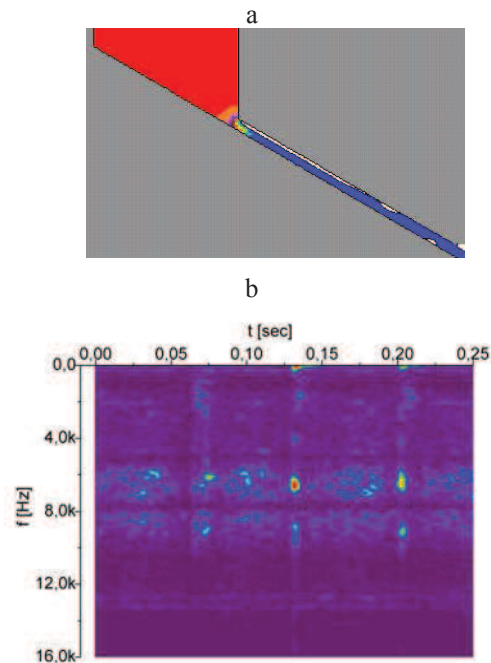
Linia 2 odpowiada drganiom grzybka zaworu głównego. Widoczne krótkotrwałe (punktowe) okresy nasilenia drgań po okresach zamknięcia przepływu wywołanego gwałtownym spadkiem ciśnienia podawanego przez pompę. Taki obraz drgań często jest obserwowany podczas homogenizacji cieczy o niskiej lepkości (mleko). Nie jest on korzystny dla trwałości zaworów i wyklucza zastosowanie materiałów ceramicznych.

Linia 3 odpowiada uderzeniu płynu o ścianki kanału odpływowego po wypływie ze szczeliny zaworu homogenizującego. Widoczne jest nasilenie intensywności procesu w środkowej części każdego z okresów, co odpowiada maksymalnemu uchyleniu grzybka zaworu.

Linie 3a zidentyfikowano jako drgania kawitacyjne powstające w końcowej (wyjściowej) strefie szczeliny zaworu. Proces kawitacji jest także przyczyną drgań odpowiadających linii 4. Związane są one z kawitacją powstającą za krawędzią rozdzielającą kanał dopływowy od zasadniczej szczeliny homogenizującej w początkowej (wejściowej) strefie zaworu. Powstanie jej w tym miejscu jest szczególnie niebezpieczne dla jego trwałości. Porównanie spektrogramów drgań zarejestrowanych przy różnych warunkach eksploatacyjnych i przy homogenizacji różnych mediów potwierdza zwiększanie się intensywności procesu ze wzrostem temperatury, zmniejszeniem lepkości homogenizowanej cieczy, zmniejszeniem ciśnienia w kanale ssącym. Wzrost ciśnienia homogenizacji nie prowadzi w przypadku nowego zaworu do zasadniczych zmian w obrazie akustycznym rys.2. Obserwuje się najczęściej zwiększenie natężenia drgań, oraz wzrost ich częstotliwości. Spowodowane jest to zmianą

charakterystyki elementu elastycznego (zwiększenie napięcia sprężyny zaworu głównego najczęściej prowadzące do zmiany jej podatności w wyniku odkształcenia sprężyn talerzowych), oraz wzrostem prędkości przepływu i nasileniem procesów hydrodynamicznych.

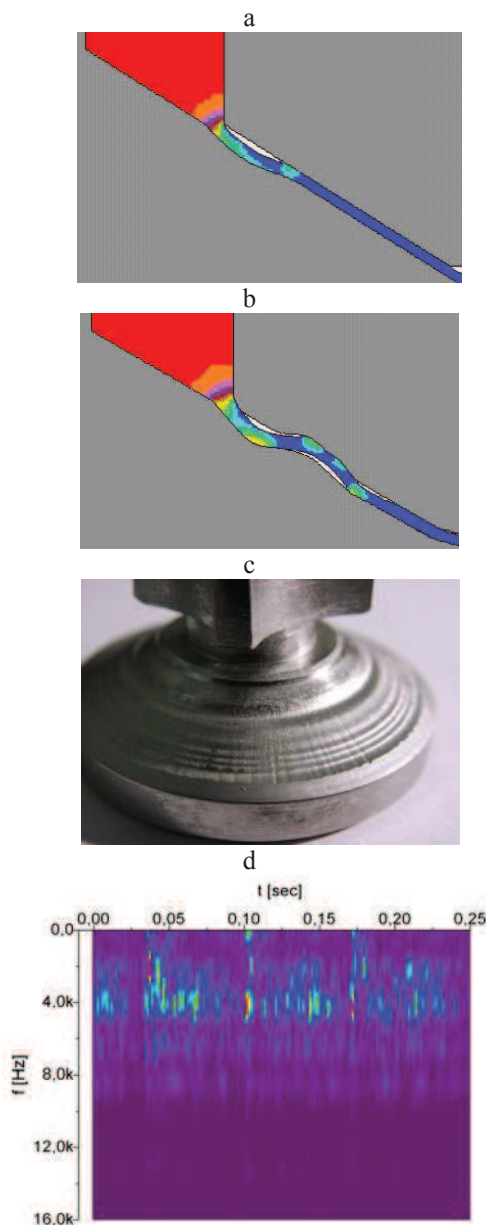
Przy pewnym doświadczeniu popartym identyfikacją zjawisk zachodzących podczas pracy urządzenia możliwe jest szybkie porównywanie ich między sobą. Możliwe jest także wnioskowanie o intensywności i charakterze obserwowanych procesów, konieczności podejmowania dalszych działań np. przerwania dalszej jego eksploatacji.



Rys.2. Zawór stożkowy klasyczny: a – rozkład ciśnienia podczas przepływu, b - spektrogram pracy homogenizatora ciśnieniowego podczas homogenizacji soku z marchwi przy ($P_h=16MPa$)

Zasadniczą zmianę obrazu spektralnego obserwuje się w przypadku zaworu z wyraźnymi śladami zużycia rys.3. Podczas pracy takiego zaworu obserwuje się zwiększanie (rozmycie) pasma częstotliwości drgań generowanych przez przepływające medium. W początkowej fazie obserwuje się powiększenie obszaru objętego kawitacją w strefie wejściowej szczeliny rys.3a. Dochodzi do pogłębiania stref zużycia erozji innych miejsc pojawienie się nowych obszarów objętych kawitacją rys.3b.

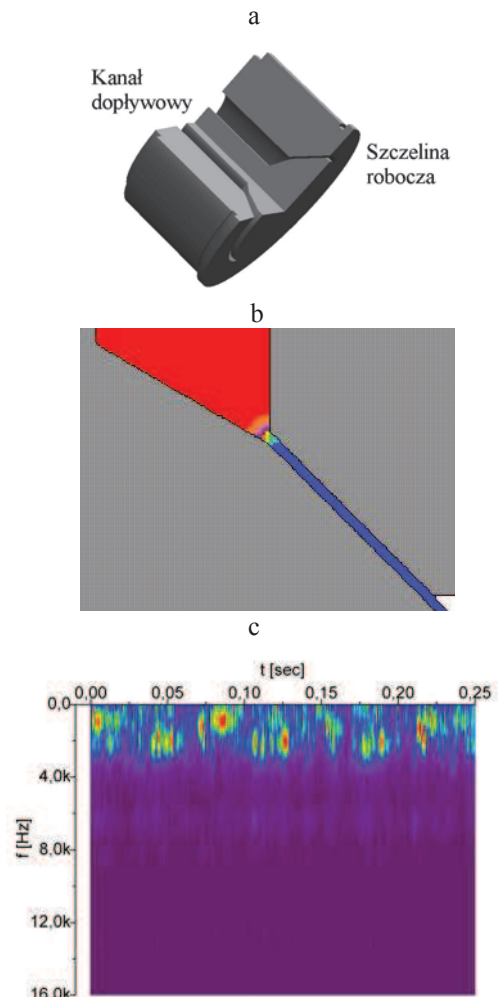
Stan ten jest wynikiem wpływu geometrii kanału przepływowego na intensywność i rodzaj procesów hydrodynamicznych na skutek wzrostu oporów przepływu. Nasila się nieregularność drgań, obniża się ich częstotliwość, wzrasta amplituda. Identyfikacja poszczególnych procesów i zjawisk staje się bardzo trudna. Doprowadzenie do takiego



Rys. 3. Przykład rozwoju zużycia zaworu stożkowego i jego wpływ na charakterystykę wibracyjną pracy homogenizatora: a, b – rozkład ciśnienia homogenizowanego medium podczas przepływu w początkowej i kolejnej fazie zużycia zaworu, c - fotografia grzybka zużytego zaworu, d - spektrogram podczas homogenizacji soku z marchwi przy ($P_h=16MPa$)

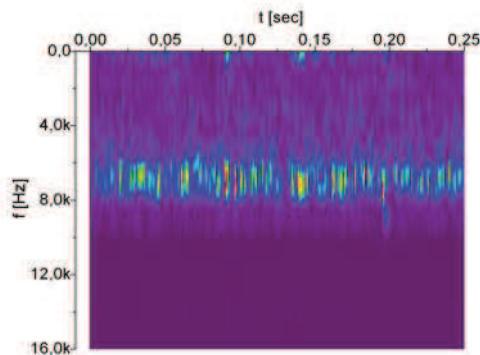
stanu związane jest ze spadkiem efektywności i jakości homogenizacji. Wskazane jest przerwanie jego dalszego stosowania. Jednakże brak elementów umożliwiających ciągłą ocenę jakości procesu homogenizacji prowadzi do nader częstego przedłużania eksploatacji nadmiernie zużytych zaworów. Zastosowanie nadzoru wibroakustycznego w tej sytuacji byłoby uzasadnione i pożądane.

Zmiany geometrii zaworu mające ograniczyć intensywność zużycia hydrościernego i erozji jego elementów przez cząsteczki stałe zawarte w homogenizowanych produktach prowadzą do istotnych zmian spektrogramów jego pracy. Wykorzystanie analizy spektralnej pozwala na ocenę wprowadzanych zmian pod kątem przeciwdziałania i zmniejszenia intensywności niepożądanych procesów (np. kawitacji). Przykładem jest zawór dwustożkowy zastosowany w miejsce zaworu typowego. Zmiana usytuowania kanału dopływowego względem szczeliny homogenizującej i kąta otwarcia zaworu prowadzi do wyraźnego wzrostu intensywności drgań w zakresie niskich częstotliwości – rys.4. Dotyczy to zarówno drgań zaworu głównego jak i drgań generowanych przez wypływający ze szczeliny płyn. Nie rejestruje się w tym przypadku w ogóle drgań kawitacyjnych ze strefy wejściowej szczeliny zaworu. Stwierdza się jedynie niewielką kawitację w strefie wyjściowej szczeliny zaworu.



Rys.4. Zawór dwustożkowy: a – szkic konstrukcji, b – rozkład ciśnienia podczas przepływu, c – spektrogram pracy podczas homogenizacji soku z marchwi przy ($P_h=16MPa$)

Potwierdzeniem tego faktu są przytoczone wyniki modelowania przepływu w tak ukształtowanym zaworze rys.4b. Intensywność procesów wibracyjnych świadczy o konieczności zmniejszenia kąta otwarcia szczeliny roboczej.



Rys.5. Spektrogram homogenizatora ciśnieniowego z nowym stożkowym zaworem homogenizującym podczas przepływu śmietany (18%) przy ciśnieniu ($P_h=11MPa$)

Cykliczność wpływu homogenizowanego medium ze szczeliny zaworu w tym przypadku jest praktycznie niezauważalna.

Rozproszenie i nieregularne rozmieszczenie obszarów świadczących o zwiększonej amplitudzie drgań przy różnych częstotliwościach dowodzi nieregularności drgań grzybka zaworu. Jest ona w głównej mierze spowodowana zbyt dużą podatnością sprężyny podpierającej w układzie regulacji ciśnienia.

Ze zwiększeniem gęstości homogenizowanego medium obserwuje się złagodzenie warunków pracy zaworu, co przejawia się zmniejszeniem intensywności drgań zaworów bloku rozdzielczego i zaworu głównego. Zwiększa się natomiast intensywność drgań generowanych wpływem homogenizowanego czynnika. Praktycznie nie rejestruje się w tym przypadku drgań w zakresach identyfikowanych ze zjawiskiem kawitacji. Brak jest także widocznych śladów pulsacyjnej pracy pompy.

4. PODSUMOWANIE

Tradycyjne metody analizy wibroakustycznej wykorzystujące metodę FFT niejednokrotnie zawodzą podczas badania szybkozmiennych procesów, oraz w przypadkach, gdy dochodzi do krótkotrwałych zmian częstotliwości drgań. W przypadku homogenizatorów ciśnieniowych obserwuje się cykliczne zmiany warunków pracy wywołane pulsacją ciśnienia podawanego przez pompę, drgania zaworów wywołujące zmiany warunków przepływu, zmiany spowodowane zużyciem itp. Przeprowadzone badania potwierdziły istotność zmian w dziedzinie czasu, natomiast nie wykazano zmian w dziedzinie częstotliwości. Wykorzystana w badaniach metoda JTFA pozwala

na szybsze uzyskanie pełniejszych wyników niż uzyskiwane metodą klasycznej transformaty Fouriera. Ponadto spektrogram w postaci jednego wykresu pełniej przedstawia wibroakustyczny obraz stanu określonego urządzenia, co jest korzystne z praktycznego punktu widzenia. Jego prawidłowa interpretacja wymaga zebrania dostatecznej ilości danych o prawidłowych i anormalnych stanach jego pracy. Przedstawione przykłady ilustrują jak znaczna jest ta zmienność i złożoność oceny jego pracy. Zaobserwowano, że zwiększenie trafności wnioskowania wymaga zwiększonej rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości, przy dopuszczeniu zmniejszonej rozdzielczości w dziedzinie czasu.

5. LITERATURA

- [1] Cempel Cz.: Wibroakustyka stosowana. PWN Warszawa 1989, s. 278.
- [2] Cohen L.: Time-frequency distribution – a review. Proc. IEEE 77 1989, s. 941-981.
- [3] Kieldsen M., Arndt R.: Joint Time Frequency Analysis Techniques: a study of transitional dynamics in sheet/cloud cavitation, Cavitation 2001
- [4] Kurowski W.: Dyskretne widmo Fouriera w diagnostyce wibroakustycznej. DWiPPB Białystok 1997, s. 186.
- [5] Łukasik K.: Możliwości analizy wibroakustycznej i badań diagnostycznych systemu przepływowego zaworów homogenizujących. Diagnostyka. Vol 26 2002 s. 111-115
- [6] Norton M. P.: Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers. CUP Cambridge 1989, s. 619
- [7] Stinger J.D.: Hydraulic systems Analysis an introduction. The Macmillan Press Ltd. London 1976. s.173.
- [8] Quian S.; Chen D.: Joint Time-Frequency Analysis – Methods and Applications. Prentice-Hall Inc.; Upper Saddle River, New Jersey, 1996.



Dr inż. Krzysztof Łukasik jest pracownikiem Katedry Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. W swojej pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami zużycia narzędzi, oprzyrządowania technologicznego, oraz wykorzystaniem technik komputerowych do detekcji i modelowania przebiegu procesów zużycia w obróbce plastycznej i przetwórstwie spożywczym.