

WYKORZYSTANIE SYGNAŁU WIBROAKUSTYCZNEGO DO OCENY ZUŻYCIA FREZU KULISTEGO

Piotr WITTBRODT

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań diagnozowania zużycia kulistych frezów monolitycznych węglkowych przy wykorzystaniu sygnałów wibroakustycznych. Do estymacji symptomów zużycia frezu z sygnału wibroakustycznego użyto kilku cyfrowych metod. Dokonano porównania metod, takich jak analiza spektralna, kurtoza widmowa, cepstrum, analiza falkowa w celu określenia ich skuteczności oraz potencjalnych możliwości zastosowania do systemów prognozujących zużycia narzędzia w procesie obróbki frezowaniem. Do diagnozowania zużycia wykorzystano sieć neuronową typu MLP.

Słowa kluczowe: trwałość i zużycie frezów, analiza spektralna, kurtoza widmowa, cepstrum, analiza falkowa, sygnał wibroakustyczny, sieć neuronowa, MLP.

1. Wprowadzenie

Informacja o stanie narzędzia skrawającego ma podstawowe znaczenie dla automatyzacji procesów skrawania. Ze względu na ekonomię wytwarzania dąży się do wykorzystania w maksymalnym stopniu zdolności obróbczych narzędzi. Taka strategia prowadzi jednak do zwiększenia ryzyka uszkodzenia katastroficznego narzędzia. Ocena stanu narzędzia może być dokonana w sposób bezpośredni metodami optycznymi, jednakże tylko w przerwach między cyklami obróbczymi lub pośrednio wykorzystując w tym celu symptomy zjawisk towarzyszących procesowi skrawania takich jak siły czy drgania wibroakustyczne w szerokim zakresie częstotliwości. Metoda pośrednia oceny stanu narzędzia jest metodą ciągłego monitorowanie stanu narzędzia bez przerywania procesu skrawania.

Liczne badania wykazały, że istnieją zależności przyczynowo – skutkowe między stopniem deformacji ostrzy skrawających wynikających z ich eksploatacji a wieloelementowym wektorem informacji pozyskanym w procesie rejestracji sił lub drgań. Problemem, dla którego poszukujemy rozwiązań jest jednak jednoznaczność przypisania stanu zużycia geometrycznego i technologicznego narzędzia pewnym wybranym wartościom wektorów wyznaczonych z rejestrowanych symptomów.

Problem ten ma szczególne znaczenie podczas obróbki wysokowydajnej frezami kulistymi. Frezy te są narzędziami wielostrzowymi i stosowane są do kształtowania skomplikowanych powierzchni przestrzennych. Taka specyfika pracy determinuje różne zmienne w czasie obciążenie ostrzy skrawających. Już chwilowe przeciążenie może spowodować uszkodzenie jednego z ostrzy frezu we fragmencie współpracującym z przedmiotem. Takie uszkodzenie wydaje się być niezauważalne, lecz w następnym cyklu obróbkowym może prowadzić do zużycia katastroficznego. Wyeliminowania takich przypadków a także sytuacji bezpośredniego zagrożenia wejściem w fazę destrukcji służą systemy diagnostyczne.

Należy sądzić, że w najbliższej przyszłości systemy diagnostyki stanu narzędzi, kontrolujące ich stan w czasie trwania obróbki, będą standardowym wyposażeniem systemów sterowania obrabiarek.

2. Stan diagnostyki zużycia narzędzi podczas frezowania w literaturze światowej

W literaturze spotyka się podział metod diagnozowania stanu frezów na bezpośrednie i pośrednie [5, 11, 12]. Pierwsze są konstruowane tak, aby dostępnymi technikami pomiarowymi wykryć zmiany geometrii poszczególnych ostrzy frezu. Dominują tu techniki pomiarowe optyczne i dotykowe (sondy pomiarowe). Techniki te mogą być realizowane poza strefą skrawania i często wymagają zaprogramowania przerw w pracy obrabiarki w celu wykonania pomiarów kontrolnych. Spotyka się również konstrukcje oparte na zjawisku zmiany rezystancji, między narzędziem a przedmiotem obrabianym, w fazie nadmiernego zużycia ostrzy frezu. Metoda ta jednak charakteryzuje się znaczną podatnością na zakłócenia przez inne zjawiska towarzyszące skrawaniu.

Metody pośrednie wykorzystują zapis różnego rodzaju energii rozpraszanej w procesie skrawania. Procesowi temu towarzyszą zjawiska cieplne i wibroakustyczne. Mierzalne symptomy tych zjawisk stanowią pewnego rodzaju wielowymiarowy obraz procesów zachodzących w strefie skrawania. Przy założeniu ustalonych, dla konkretnej operacji obróbkowej, parametrów masowo – sprężystych układu OUPN (obrabiarka, uchwyt, przedmiot, narzędzie) oraz właściwości termicznych, można zakładać, że zmiany tego obrazu są wywołane zmianami o charakterze destrukcyjnym narzędzia. Wykorzystując powyższe założenie, dla celów diagnostycznych rejestruje się: składowe siły skrawania [4, 18], moc skrawania [22], emisję akustyczną (w paśmie ultradźwiękowym) [14, 20], drgania generowane ze strefy skrawania [21], temperaturę w obszarze strefy skrawania [17, 19].

Wszystkie wymienione i obecne w literaturze metody pośrednie pozyskania informacji o stanie frezu mają wspólną cechę, zastosowanie ich w praktyce wymaga przeprowadzenia badań ustalających wzorzec wartości mierzonych symptomów odpowiadający umownym stanom przydatności lub nieprzydatności narzędzia do dalszej pracy. Ponadto trzeba pamiętać, że ten wzorzec jest adekwatny tylko dla identycznych warunków pomiaru użytego do diagnostyki symptomu. Dodatkowo problem porównywania stanu narzędzia na poziomie symptomów komplikuje się, gdy zarejestrowany sygnał może mieć wiele mierzalnych cech np. amplitud dla różnych częstotliwości w zarejestrowanym sygnale drganiowym.

Z analizy literatury przedmiotu wynika, że najchętniej stosowane są metody oparte o pomiar sił skrawania. Jako symptom średniego zużycia ostrzy frezu przyjmuje się wzrost uśrednionej siły skrawania mierzonej na wytypowanym stałym odcinku toru narzędzia. Porównując wartość tej siły z wartością zmierzoną dla ostrego narzędzia można obserwować charakter postępów jego zużycia. Punkt krytyczny, w czasie eksploatacji narzędzia w którym nastąpi jego wymiana, należy wyznaczyć każdorazowo doświadczalnie. Uśrednienie sygnału siły sprawia, że system nie nadaje się do detekcji stanów katastroficznych, gdyż nie reaguje na skokowe zmiany siły, charakterystyczne dla takich zdarzeń. Ponadto, do pomiarów składowych sił skrawania konieczna jest instalacja drogich siłomierzy montowanych w przyrządach ustalająco – mocujących na stole obrabiarki dodatkowo zmniejszających sztywność układu OUPN.

Spotykane w literaturze opisy prób wykorzystania pomiaru mocy skrawania do celów diagnostyki frezu dotyczą głównie obróbki skał w górnictwie. Zastosowanie tego sygnału w obróbce szybkościowej metali nie sprawdza się w praktyce ze względu na bardzo niską

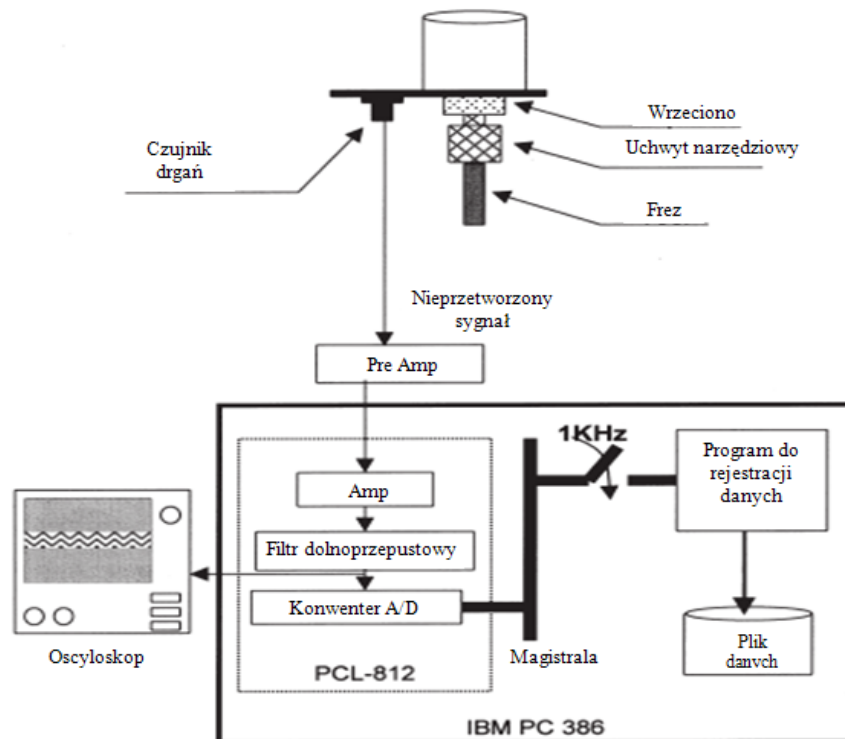
wrażliwość na zużycie technologiczne oraz znaczne opóźnienie pojawiania się symptomów zużycia katastroficznego w sygnale diagnostycznym.

Systemy oparte o zjawisko emisji akustycznej są dosyć rzadko spotykane, gdyż wymagają drogiej aparatury pomiarowej pracującej w obszarze ultradźwiękowym. Bazują one na zjawisku generowania fali ultradźwiękowej przez struktury materiałowe poddane wyężeniu powodującym ich powolną destrukcję. Ponieważ zjawiska mikrowykruszeń i pęknięć materiału ostrzy frezów mają miejsce w czasie pracy, natężenie sygnałów pochodzących ze strefy skrawania, w paśmie ultradźwiękowym mogłoby stanowić miarę stopnia zużycia narzędzia. Wyniki badań nad zastosowaniem tej metody diagnostyki wskazują na znaczną liczbę nieuzasadnionych alarmów, co może sugerować konieczność dalszych prac nad wyfiltrowaniem istotnych informacji z zarejestrowanego sygnału.

Zmiany temperatury w strefie skrawania spowodowane stopieniem narzędzia wynikają ze zjawiska powstania większych oporów skrawania i rozproszenia znacznej części wprowadzonej do procesu energii na ciepło. Skutkuje to wzrostem temperatury. Jednakże zjawisko może być zaobserwowane z pewnym opóźnieniem ze względu na pojemność cieplną całego układu OUPN. Obserwacja sygnału diagnostycznego także jest utrudniona, gdyż instalacja termometru w wirującym narzędziu jest trudna. Natomiast obserwacja przy użyciu kamery termowizyjnej może dawać wyraźny obraz diagnostyczny dla skrajnie obciążonego narzędzia w sytuacji zbyt późnej na reakcje. Dodatkowo ta metoda pomiaru jest wrażliwa na obecność płynów chłodząco – smarujących w strefie skrawania.

Wykorzystanie drgań wibroakustycznych generowanych ze strefy skrawania do celów diagnostycznych, wydaje się być metodą najmniej inwazyjną w proces skrawania i konstrukcję obrabiarki. Rejestrowany sygnał powstaje w wyniku pobudzenia do drgań wszystkich elementów układu OUPN. Pobudzenie to wynika z okresowych zmian wartości sił skrawania charakterystycznych dla procesu frezowania. Wzrost amplitudy tego pobudzenia spowodowany większymi oporami skrawania tęym narzędziem może powodować wzrost amplitud drgań elementów oprzyrządowania i obrabiarki, szczególnie tych, których częstości drgań własnych są zbliżone do częstości wymuszeń. Jednocześnie jednak zauważa się inne zjawisko, wzrost stopnia tłumienia drgań na styku powierzchni styku ostrza stopionego z powierzchnią obrabianą. Zjawiska te nakładają się i obraz sygnału wibroakustycznego, w celu wykorzystania do diagnostyki narzędzia, musi być odpowiednio przetworzony.

Symptomy drgań generowanych ze strefy skrawania do celów diagnostycznych zostały wykorzystane przez Jun i Suh a przedstawione w pracy [8] (rys. 1). Rejestrowany sygnał wibroakustyczny podczas obróbki porównywany był z wartościami sygnału otrzymanego z eksperymentu w podobnych warunkach. Próg zużycia narzędzia, jako kryterium stopienia, określany był w sposób automatyczny na podstawie zarejestrowanych danych eksperymentalnych w tym ocena wizualna narzędzia. Zaproponowany model diagnostyczny był układem uniwersalnym uwzględniającym różne warunki skrawania. Uniwersalność systemu wymagała wykonanie znacznej ilości badań wstępnych, co jest wadą tego rozwiązania. Na podstawie otrzymanych wyników opracowano system komputerowy pozwalający skutecznie oszacować złamanie narzędzia w 94 %.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego wykorzystujący sygnał wibroakustyczny [8]

Zastosowanie metod sztucznej inteligencji, mogą rozwiązać problem dużej liczby badań eksperymentalnych. Dane wejściowe do uczenia mogą być pozyskane w trakcie kilku lub kilkunastu prób zużyciowych narzędzia. Zasadę uczenia, wykorzystali Li, Dong, Venuvinod w pracy [13] oraz Chen i Black [3]. Autorzy wykorzystując relację między składowymi sygnału drganiowego a warunkiem zużycia narzędzia skrawającego, określili powiązania częstości zmian drgań oraz ich wartości skutecznych z cechami zużycia. Otrzymane zależności posłużyły jako dane wejściowe do algorytmu uczącego określającego próg zużycia. Algorytm uczenia realizowany został przy wykorzystaniu modeli rozmytych sieci neuronowych (Fuzzy Neural Network). Doświadczalne wyniki badań wykazały skuteczność wykorzystania składowych sygnałów drgań w oparciu o metody sztucznej inteligencji do monitorowania warunku zużycia wiertła. W dalszych badaniach, należy podjąć próbę adaptacji tego systemu monitorowania dla kulistych narzędzi frezarskich.

Strategie opisywane w literaturze, które bazują na analizie częstotliwościowej sygnałów wibroakustycznych wykazują duże zróżnicowanie i w większości przypadków stanowią dopiero bazę do dalszych badań [1, 23]. W dalszym ciągu pojawiają się opracowania o charakterze badań podstawowych i laboratoryjnych, co potwierdza, że problem analizy sygnałów drganiowych w kontekście nadzorowania stanu ostrza w trakcie obróbki przestrzennej jest stosunkowo słabo przebadany.

3. Plan eksperymentu badawczego i opis stanowiska badawczego

Celem wykonania eksperymentu było oszacowanie wrażliwości symptomów sygnału wibroakustycznego na zmiany geometrii narzędzia w trakcie jego zużywania. Proces frezowania frezem kulistym próbki o ustalonej geometrii zbadano przy zmiennych parametrach geometrycznych i technologicznych. Zmianę parametrów realizowano przez zmianę prędkości obrotowej, głębokości skrawania i posuwu. Jedynym, stałym parametrem geometrycznym była szerokość skrawania.

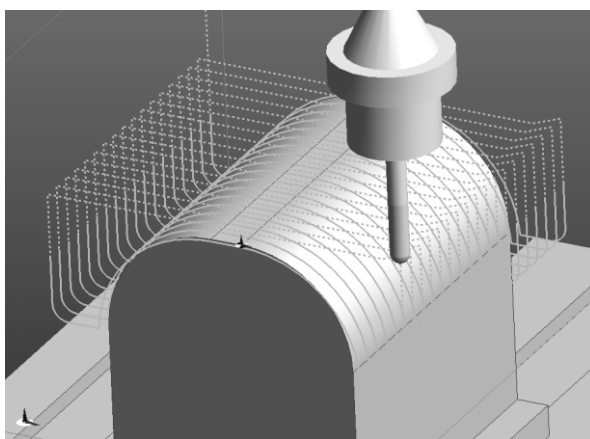
Na stole frezarki umieszczono i zamocowano przedmiot obrabiany oraz dodatkowo próbkę, która służyła do testowania narzędzia przy stałych warunkach skrawania (posuw, głębokość skrawania, prędkość, podatność i masa próbki). Eksperyment badawczy polegał na akwizycji sygnału wibroakustycznego generowanego podczas skrawania testowej próbki frezem kulistym. Pierwszego zapisu dokonano dla nowego w pełni sprawnego narzędzia. Następnie rejestrację prowadzono po cyklu pracy narzędzia, w czasie którego obrabiano przedmiot o złożonych kształtach. Proces skrawania miał cechy wysokowydajnościowej obróbki zgrubnej i wykańczającej. Po rejestracji sygnału wibroakustycznego, frez był poddawany, przy pomocy metod optycznych, ocenie stopnia zużycia na powierzchniach przyłożenia ostrzy. Eksperyment prowadzono do chwili zaobserwowania uszkodzeń ostrzy skrawających zagrażających zużyciem katastroficznym.

Z punktu widzenia poznawczego interesujący jest także proces zmian zachodzących w sygnale wibroakustycznym w trakcie zużycia katastroficznego i chwilę przed tym zjawiskiem. Wynik takich obserwacji pozwolił na opracowanie algorytmu przewidywania stanów awaryjnych. Eksperyment, w czasie którego zarejestrowano charakterystyczne zmiany w obrazie sygnału wibroakustycznego polegał na prowadzeniu procesu skrawania i rejestracji aż do momentu katastroficznego zużycia.

Badania prowadzono na trzyosiowej frezarce o sterowaniu numerycznym dla różnych, ustalonych warunków skrawania:

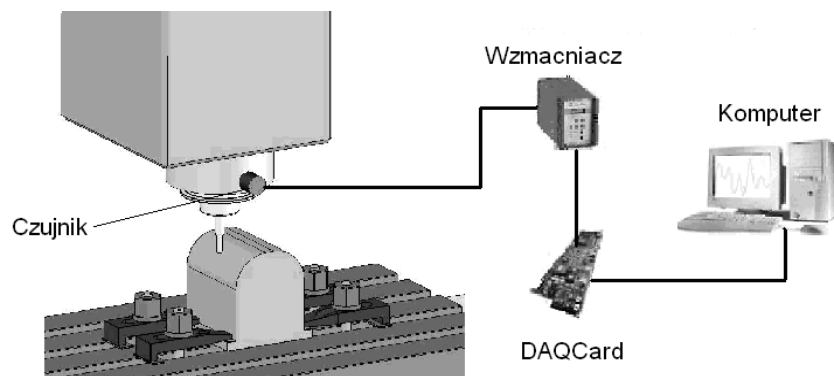
- głębokość $a_p=0,3; 0,7$ mm i szerokość $b=0.3$ mm,
- posuw $f=500; 1080; 1620$ mm/min;
- obroty $n=500; 1000, 1500, 3000$ obr/min.

Program sterowania obrabiarką był wygenerowany za pomocą programu CAM. Schemat przebiegu ścieżki narzędzia podczas obróbki przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat przebiegu ścieżki narzędzia podczas obróbki

Zastosowano frez monolityczny z węgla spiekane go typu F344X06D13 – 057C06U, bez pokrycia, ϕ 6 h10 o ustalonej geometrii ostrza. Skrawaniu poddawano próbkę o ustalonej wymiarach ze stali ŁH 15 SG.

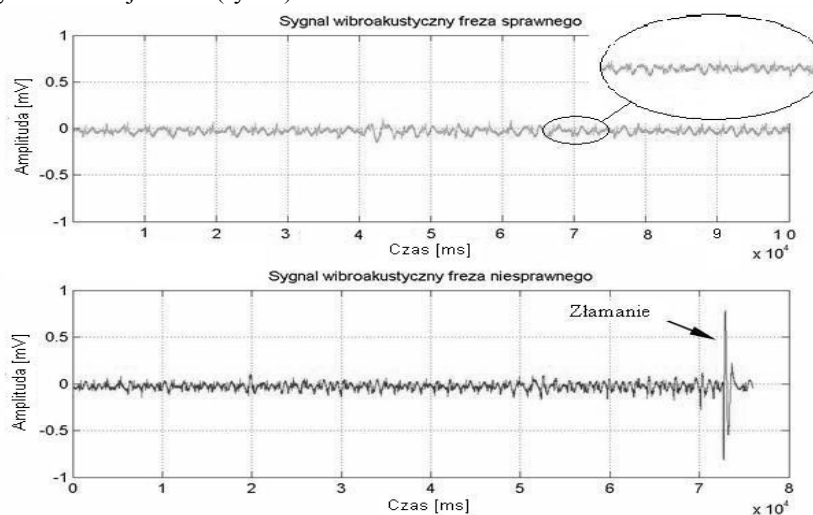


Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego

Wykorzystany w badaniach układ monitorujący składał się z czujnika wibroakustycznego umieszczonego bezpośrednio na obudowie wrzecionie obrabiarki, który współpracował ze wzmacniaczem ładunku (rys. 3). Sygnał wibroakustyczny pochodzący ze wzmacniacza ładunku kierowano do przetwornika analogowo – cyfrowego DAQCard 700. Ostatecznie sygnał został przesłany do komputera klasy PC, który archiwizował otrzymane wyniki na dysku twardym w postaci plików tekstowych (*.txt). Do budowy interfejsu układu pomiarowego zastosowano specjalistyczne oprogramowanie LabView.

4. Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano szereg przebiegów amplitudowo – czasowych w funkcji czasu (rys. 4).



Rys. 4. Przykładowe przebiegi amplitudowo – czasowe

W celu określenia wycinków czasowych odpowiadających za zużycie naturalne, wykruszenie

i złamanie narzędzia, sygnał został poddany kolejno:

- filtracji;
- przekształceniu FFT ;
- obliczeniu odległości Euklidesowych (odIE) między wektorami charakteryzującymi bieżący stan frezu a stan początkowy:

$$odl(x, y) = \left[\sum_i (x_i - y_i)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

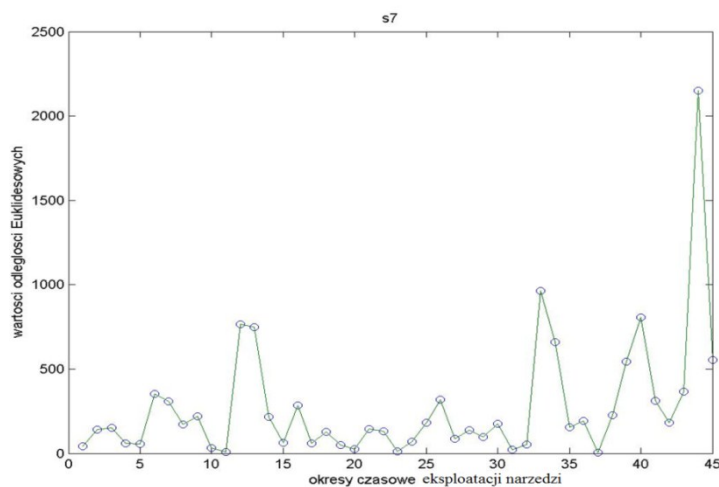
gdzie: odl – odległość Euklidesowa,

x – wektor widma narzędzia ostrego,

y – wektor widma sygnału bieżącego.

Tak przygotowany wstępnie sygnał poddano dalszej analizie, aby określić związki między parametrami sygnału wibroakustycznego a stanem ostrzy.

Na podstawie otrzymanego i podzielonego sygnału obliczono widmo mocy (metodą FFT) dla poszczególnych próbek pochodzących z kolejnych testów narzędzia (rys. 5).

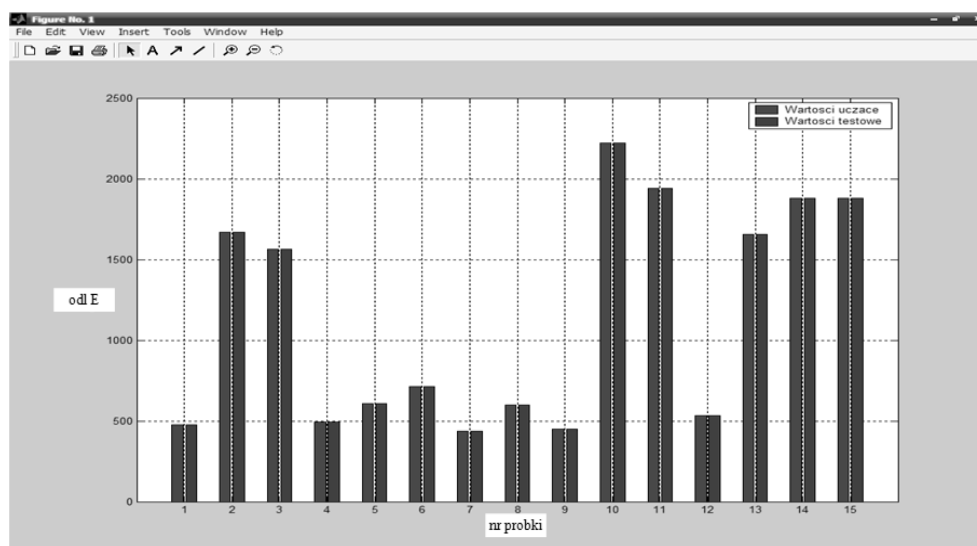


Rys. 5. Wartości odległości Euklidesowych

W metodzie rozpoznawania wzorca, która polega na określeniu odwzorowania przestrzeni pomiarowej w przestrzeń decyzyjną wykorzystano algorytm z zakresu sztucznej sieci neuronowej [6, 7, 10, 15]. Poprzez porównanie sygnału pomiarowego z wzorcowym następuje diagnoza, ocena zużycia.

Wybór optymalnej liczby warstw ukrytych oraz liczby neuronów w poszczególnych warstwach dokonano na podstawie testowania zachowania sieci dla różnych parametrów pod względem szybkości uczenia sieci oraz wartości błędu. W rozważanym problemie zastosowano sieć neuronową typu wielowarstwowy perceptron MLP. Proponowaną sieć o

strukturze trójwarstwowej z jedną warstwą ukrytą składającą się z 20 neuronów, uczone algorytmem propagacji wstecznej z liniową funkcją aktywacji. Funkcja ta okazała się najlepszą funkcją uczącą. O jej wyborze zdecydowała nie tylko szybkość uczenia, ale również poprawne dopasowanie rzeczywistego zużycia do zamodelowanego wzorca. Po nauczeniu sieci, to znaczy po osiągnięciu kryterium 5% błędu względnego dokonano testowania na zbiorach niebiorących udziału w procesie uczenia. W modelu na wejściu w fazie uczenia poddano kolejno wartości odległości Euklidesowe przesunięte w czasie o stałą wartość t a na wyjściu wartość wskaźnika zarejestrowany w czasie t_0+t . W kolejnym modelu informację uzupełniono o parametry technologiczne i geometryczne obróbki frezowaniem (rys. 6). Tak opracowany model pozwolił na generowanie sygnału ostrzegającego o istnieniu zagrożenia wykruszeniu narzędzia oraz na oszacowaniu czasu jaki pozostał do zakończenia eksploatacji narzędzia. Jeżeli liczony wskaźnik odległości Euklidesowych z bieżącego sygnału wibroakustycznego przekroczył kilkakrotnie wartość poprzedniego pomiaru, układ natychmiast mógł wygenerować sygnał przerwania obróbki.



Rys. 6. Przewidywany stan zużycia frezu przez sieć neuronową

W celu porównania skuteczności estymacji cech sygnału wibroakustycznego przeprowadzono analizę kilku cyfrowych metod, takich jak, analizę spektralną, kurtozę widmową [16], cepstrum oraz analizę falkową [2, 9].

Analiza porównawcza cyfrowych metod wykazała, że metody estymacji cech sygnału wibroakustycznego

w sposób różny korelują stopień zużycia narzędzia. Naturalne stępienie narzędzia nie jest możliwe do określania metodami kurtozy widmowej oraz analizy cepstrum. Przyczyną takiego stanu jest złożony proces frezowania frezem kulistym. Sygnał drganiowy będący nośnikiem informacji o uszkodzeniu jest maskowany przez inne źródła drgań i nie ma możliwości skutecznie określić ani ustalić amplitudy drgań związanych z uszkodzeniami ostrza oraz typu wykruszenie.

Małe możliwości określenia naturalnego zużycia narzędzia wykazuje metoda analizy specgram. Niestety, ze względu na niewielki wzrost amplitudy specgram przy wzroście

amplitudy sygnału podczas wykruszenia, z praktycznego punktu widzenia nie ma możliwości zastosowania. Wyraźny wzrost jest widoczny jedynie podczas złamania narzędzia.

Obiecujące wyniki estymacji cech sygnału wibroakustycznego otrzymano podczas analizy falkowej. Metoda ta ma możliwości do wykrywania zużycia naturalnego i katastroficznego ostrzy narzędzia. Wyraźnie zauważalne są wzrosty amplitud podczas wykruszenia czy złamania narzędzia.

5. Wnioski z przeprowadzonych eksperymentów badawczych

W wyniku przeprowadzonych badań, potwierdzono słuszność przyjętego układu identyfikującego zużycie. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że w niektórych przypadkach frezowania różnych elementów o różnych kształtach, wartości szukanych wskaźników zużycia mogą przyjmować różne wartości. Dowodzi to złożoności procesu i potwierdza, że oszacowanie uniwersalnych parametrów modelu, dokładnie opisujących zużycie

w każdych warunkach jest niezmiernie trudne.

Przeprowadzona analiza dowodzi, iż istnieją potencjalne możliwości stworzenia systemu diagnostycznego w oparciu o sieć neuronową za pomocą którego – po wstępnym dostrojeniu sieci (polegającym na uczeniu poprzez wprowadzenie do układu określonej liczby wzorców uszkodzeń) – można osiągnąć wiarygodne informacje o stanie obiektu technicznego. Zamodelowanie wzorców reprezentujących zużycie wiąże się z zebraniem dużej ilości danych. Im jest ich więcej, tym diagnoza wykonana z zastosowaniem sieci neuronowej będzie bardziej wiarygodna.

Aby zapewnić prawidłowe działanie systemu diagnostycznego dane te muszą być reprezentatywne dla wszystkich możliwych uszkodzeń narzędzia tzn. powinny pochodzić z możliwie jak najszerszego zakresu zmienności technologicznych wielkości wejściowych.

Literatura

1. Barczewski R., Analiza porównawcza metod analizy czasowo-widmowej, Inżynieria diagnostyki maszyn, praca zbiorowa pod red. B. Żółtowskiego i C. Cempla, PTDTITE, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.
2. Białasiewicz J.: Falki i aproksymacje. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2004.
3. Chen J. C., Black J. T., A Fuzzy – Nets In – Process (FNIP) system for tool – breakage monitoring in end-milling operations, Int. J. Mach. Tools Manufact. 37 (6), 783 – 800, 1997.
4. Cus F., Milfelner M., Balic J., An intelligent system for monitoring and optimization of ball – end milling process. Journal of Materials Processing Technology 175, 90 – 97, 2006.
5. Dimla D. E. Sr., Sensor signals for tool – wear monitoring in metal cutting operations a review of methods, International Journal of Machine tools and Manufacture 40 (8), 1073 – 1098, 2000.
6. Gawlik J., Karbowski K., Prognozowanie stanu ostrza skrawającego z zastosowaniem sieci neuronowych. Mechanik nr 4/1997.
7. Jemieliak K., Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawaniem, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.

8. Jun C. – H., Suh S. – H., Statistical tool breakage detection schemes based on vibration signals in NC milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, 1733 – 1746, 1999.
9. Klemiato M, Duda J.T., Analiza falkowa w diagnostyce układów regulacji. Materiały V Krajowej Konferencji N.T. Diagnostyka Procesów Przemysłowych DPP'2001, Łagów Lubuski, 17-19 września, pp .373-376, 2001.
10. Korbicz I, Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (red.) Diagnostyka procesów – modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania – praca zbiorowa. Warszawa, WNT, 2002.
11. Kościelny J. M., Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych. EXIT, Warszawa, 2001.
12. Kwon Y., Fischer G. W., A novel approach to quantifying tool wear and tool life measurements for optimal tool management, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Volume: 43, pp. 359 – 368, 2003.
13. Li X., Dong S., Venuvinod P. K., Hybrid Learning for Tool Wear Monitoring, *Int J Adv Manuf. Technol.* 16, 303 – 307, 2000.
14. Li X., A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. *Int J Mach Tool Manuf.* 42:157 – 165, 2002.
15. Lipski J., Zaleski K., Zastosowanie sieci neuronowych w systemach diagnostycznych narzędzi skrawających, *Przegląd Mechaniczny*, nr 9/2005.
16. Radkowski S., Zawisza M., Kurtoza jako parametr diagnostyczny – możliwości i ograniczenia PM zeszyt 8 1996 pp 22-27.
17. Richardson D. J., Keavey M. A., Dailami F., Modelling of cutting induced workpiece temperatures for dry milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, 1139 – 1145, 2006.
18. Shao H., Wang H. L., Zhao X. M., A cutting power model for tool wear monitoring in milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44, 1503 – 1509, 2004.
19. Toh C. K., Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel. *Journal of Materials Processing Technology* 167, 110 – 118, 2005.
20. Tonshoff H. K., Jung M., Mannel S., Rietz W., Using acoustic emission signals for monitoring of production processes, *Ultrasonics* 37, 681 – 686, 2000.
21. Wiercigroch M., Budak E., Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 359 (A), 663 – 693, 2001.
22. Young – Hun Jeong., Dong – Woo Cho., Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42, 1559 – 1566, 2002.
23. Zieliński T. P.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów – Od teorii do zastosowań, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2005.

Dr inż. Piotr Wittbrodt
Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów
Politechnika Opolska
45-370 Opole, ul. Ozimska 75
tel./fax.: (0-77) 449 88 45
e-mail: p.wittbrodt@po.opole.pl