

NADZOROWANIE I PROGNOZOWANIE STANU NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH W PROCESIE SKRAWANIA

Piotr WITTBRODT

Streszczenie. Badania nad układami nadzorowania i prognozowania narzędzi skrawających oraz procesu skrawania uzasadnione jest tym, że około 70% materiału wyjściowego wykonywanych elementów jest usuwane przez obróbkę skrawaniem, głównie przez frezowanie. W artykule przedstawiono krótką charakterystykę procesu zużycia narzędzia skrawającego, zasadę działania systemów monitorowania narzędzi skrawających stosowanych w inżynierii produkcji. Wskazano na istotne zalety tych systemów w monitorowaniu procesu skrawania a także perspektywy ich rozwoju.

Słowa kluczowe: eksploatacja, monitorowanie, prognozowanie, zużycie, narzędzie skrawające, proces skrawania.

1. Wprowadzenie

Obróbka skrawaniem jest najstarszą ze znanych i stosowanych do dzisiaj metod wytwarzania przedmiotów. Jest najczęściej stosowana ze wszystkich stosowanych technik mechanicznego wytwarzania - 60 ÷ 70%. W publikacji [1] wykazano, że połowa zużytej energii w procesach wytwarzania produktu przypada na procesy obróbki skrawaniem. Przewiduje się, że jeszcze przez długie lata będzie metodą dominującą. Należy również przypuszczać, że skrawanie z wysoką precyzją i wysokimi prędkościami będzie się rozwijało przez najbliższe lata a jej udział stale będzie wzrastał, szczególnie w produkcji części form i matryc dla przemysłu motoryzacyjnego czy lotniczego.

Rosnące wymagania klienta, jak również czynniki ekonomiczne związane z obniżeniem kosztów produkcji powodują, że projektanci i konstruktorzy tworzą coraz to bardziej skomplikowane kształty wyrobów, co wiąże się niejednokrotnie ze zmniejszeniem masy elementów. Następstwem tego są trudności podczas wytwarzania.

Dodatkowo, złożoność procesów produkcyjnych, rosnące wymagania dotyczące dokładności elementów, powszechność stosowania elastycznych systemów produkcji, automatyzacja czy robotyzacja procesów wytwórczych powoduje konieczność stosowania narzędzi informatycznych pozwalających na skuteczne monitorowanie procesu obróbki. Innym bodźcem postępu w dziedzinie sterowania procesami obróbki jest również konieczności utrzymania jak najniższych kosztów produkcji przy spełnieniu powyższych wymagań.

Wielu autorów w swoich pracach naukowych [np. 2, 3], szczególnie z dziedziny ekonomii obróbki przyjmuje, że koszty narzędziowe kształtują się w granicach od 2% do 5% ogólnych kosztów wytwarzania. W następstwie tego w wielu analizach pomija się wpływ kosztu narzędziowego na koszt wytworzenia, co powoduje błędne szacowanie kosztów produkcji. Autorzy prac [np. 4, 5] podają, że udział kosztów narzędziowych w ogólnych kosztach wytwarzania wynosi do 8%.

Badania praktyczne procesów wytwarzania i analiza rynku narzędzi skrawających pokazują, że koszt narzędzi to nawet kilkanaście procent ogólnych kosztów. Należy jednak

mieć świadomość tego, że udział ten silnie uzależniony jest od rodzaju obróbki, wielkości partii obróbkowych a także od wiedzy i umiejętności operatora urządzeń skrawających i trudno jest dokładnie go oszacować.

Pomimo nieprecyzyjnych danych o udziale kosztów narzędziowych w ogólnych kosztach wytworzenia, można stwierdzić, że są one wysokie, a więc odpowiednia gospodarka narzędziowa jest jednym ze sposobów obniżenia kosztów produkcji.

W ogólnym ujęciu gospodarka narzędziowa zajmuje się zaopatrzeniem stanowiska roboczego w niezbędne narzędzia do wykonania zleconego zadania, odpowiednim zorganizowanym przepływie narzędzi a także utrzymaniem narzędzie w dobrym stanie technicznym (wydłużenie okresu trwałości użytkowania). Szczególnie ten ostatni czynnik, z punktu widzenia obróbki skrawaniem, najistotniej wpływa na obniżenie kosztów produkcji. Dlatego też, dąży się do doboru najbardziej racjonalnych warunków obróbki. Istnieje jednak problem w ocenie bieżącego stopnia zużycia narzędzia [6, 7], co stanowi barierę w podnoszeniu efektywności procesu obróbkowego.

Obecnie w zakładach produkcyjnych często dąży się do całkowitej kontroli każdego etapu produkcyjnego, co sprzyja wdrażaniu kompleksowego systemu monitorowania narzędzi skrawających. Dzięki temu, należy się spodziewać produkcji przebiegającej w warunkach pełnej kontroli oraz możliwości ingerowania w proces już w początkowych jego fazach. Istnieją jednak przesłanki mówiące o problemach we wdrażaniu takich systemów monitorowania, w produkcji rzeczywistej, warsztatowej, zainstalowanych bezpośrednio na obrabiarce. Z jednej strony problem stanowi integracja sprzętowa, z drugiej, odpowiednie aplikacje informatyczne opisujące zjawiska towarzyszące procesom obróbkowym. Problemem są również wysokie koszty zakupu i użytkowania, uniemożliwiające powszechne ich stosowanie. Warto podkreślić, że dostępne na rynku systemy informatyczne są niewykorzystywane po upływie roku [8] a zadowolonych użytkowników jest zaledwie kilkanaście procent.

Z przeprowadzonych ankiet i konsultacji z kilkunastoma firmami z branży metalowej z sektora małych i średnich przedsiębiorstw wynika, że to właśnie te cechy układów monitorowania są przeszkodą w ich wdrażaniu w warunkach przemysłowych. Użytkownicy oczekują prostych układów, których koszt wdrożenia, uruchomienia i użytkowania będzie niewielki. Również ważnym aspektem dla odbiorcy jest brak konieczności ingerencji w budowę obrabiarki i możliwość przenoszenia układu na inne urządzenia nie powodującą przy tym ograniczenia elastyczności systemu.

Wymienione powyżej, wybrane oczekiwania potencjalnych użytkowników są zbieżne z cechami jednoczynnikowego układu monitorowania-diagnozowania-prognostowania.

Pomimo zaangażowania wielu ośrodków naukowych w budowę układów, należy uznać, że problemy monitorowania, diagnozowania czy też prognozowania stanu narzędzia i procesu skrawania nie zostały dostatecznie rozwiązane i pozostają wciąż aktualne, szczególnie podczas kształtowej obróbki frezowaniem.

2. Zużycie narzędzia skrawającego

Zużyciem ostrza narzędzia nazywa się postępującą w czasie utratę właściwości skrawnych. Mechanizm zużycia jest bardzo złożony, determinowany szeregiem czynników i zjawisk składających się na proces skrawania, takimi jak: oddziaływanie cieplne, adhezja, dyfuzja czy utlenienie. Każdy z tych czynników wpływa mniej lub bardziej na zużycie ostrza. W publikacji [9] omówiono szczegółowo zależność wpływu prędkości skrawania na zużycie ostrza narzędzia z uwzględnieniem wymienionych wyżej zjawisk.

Symptomy nadmiernego zużycia narzędzia należy również rozpatrywać pod kątem zmiany kształtu i geometrii ostrza, pęknięcia czy zmiany właściwości warstwy wierzchniej narzędzia. W odniesieniu do przedmiotu obrabianego, efektem zużycia ostrza jest zauważalne pogorszenie stanu powierzchni obrabianej oraz dokładności wymiarowo kształtowej (np. wzrost chropowatości powierzchni, przekroczenie granic tolerancji wymiarów czy kształtu).

Do identyfikacji symptomów zużycia ostrza służą liczne wskaźniki zużycia. Do najpopularniejszych należą wskaźniki z grupy wskaźników geometrycznych, technologicznych oraz energetycznych. Znajomość ich pozwala na wyznaczenie trwałości ostrza narzędzia, której estymacja umożliwia: ustalenie strategii wymiany narzędzi czy optymalizację parametrów procesu.

Wskaźniki zużycia ostrza typowych narzędzi określające zmiany geometrii ostrza skrawającego zostały w większości znormalizowane. Normy te dotyczą głównie narzędzi, takich jak: wiertła, noże tokarskie czy frezy walcowe. Dla innych, specjalnych kształtów narzędzi (np. noże tokarskie kształtowe, frezy kuliste) należy opracowywać własne, autorskie metody pomiaru wskaźników zużycia, co niejednokrotnie prowadzi do różnic i błędów pomiarowych podczas prowadzenia badań eksperymentalnych.

Do najczęściej wykorzystywanych bezpośrednich wskaźników zużycia ostrza narzędzia skrawającego należą [10]:

- VB – szerokość starcia na powierzchni przyłożenia,
- KT – głębokość żłobka mierzona w najgłębszym miejscu prostopadle do powierzchni natarcia,
- KF – położenie żłobka, mierzona jako odległość jego brzegu od pierwotnego położenia krawędzi skrawającej,
- KB – szerokość żłobka, mierzona jako odległość jego dalszego brzegu od pierwotnego położenia krawędzi skrawającej.

W pracy [11] przedstawiono koncepcję wyznaczania wskaźników zużycia frezów kulistych z węgla spiekane. Koncepcja ta została oparta o założenia wynikające z norm przeznaczonych dla frezów walcowych [12].

3. Okres trwałości ostrza

Typowa krzywa zużycia charakteryzuje się trzema okresami użytkowania ostrza: okresem docierania ostrza, normalnego zużycia ostrza, gwałtownego zużycia ostrza (obszar katastroficznego zużycia ostrza). Okres trwałości ostrza, jest to więc czas skrawania liczony od chwili rozpoczęcia pracy przez ostrze, aż do chwili, gdy wybrany wskaźnik zużycia osiągnie dopuszczalną wartość [8]:

$$w = w_o + C_w \cdot t^u \quad (1)$$

gdzie: w – całkowita wartość zużycia;

w_o – wartość dotarcia;

C_w – stała;

t – czas skrawania;

u – wykładnik potęgowy.

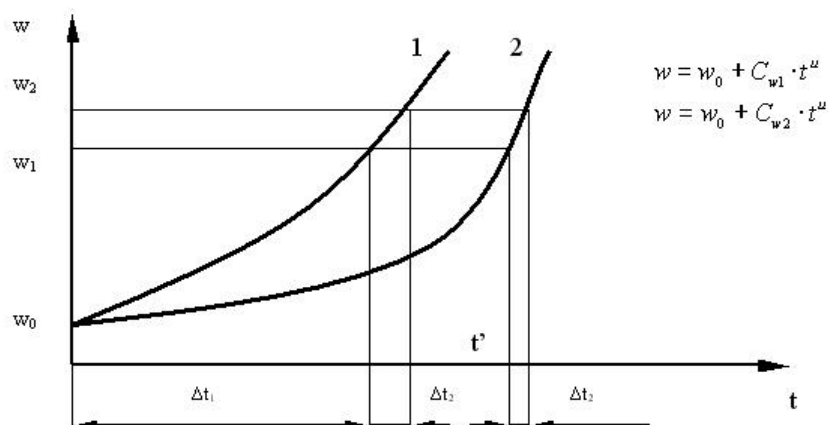
W głównej mierze na zużycie ostrza, a zatem także na okres trwałości wpływa prędkość skrawania, natomiast w mniejszym stopniu prędkość posuwowa. Wzór użytkowy

do wyliczenia okresu trwałości ostrza przy stałych parametrach technologicznych przedstawiono poniżej.

$$T = \left(\frac{V_c}{C_v} \right)^k \cdot f^{y_T} \cdot a_p^{x_T} \quad (2)$$

gdzie: V_c – prędkość skrawania;
 T – okres trwałości;
 C_v – stała;
 k – wykładnik potęgowy.
 f – posuw;
 a_p – głębokość skrawania;
 y_T, x_T – wykładniki potęgowe uwzględniające wpływ posuwu i głębokości skrawania.

Trudniejszym zagadnieniem z punktu widzenia eksploatacji narzędzia jest przewidywanie zużycia ostrza pracującego z przemiennie zmiennymi parametrami skrawania. Ostrze w tym przypadku pracuje w czasie Δt_1 przy innych parametrach skrawania niż w czasie Δt_2 . Zależność ta przedstawiona jest na rysunku 1.



Rys. 1. Krzywe zużycia przy zmiennych parametrach skrawania

Wzór opisujący wartość zużycia ostrza po skrawaniu z n zmiennymi parametrami ma postać:

$$w = w_0 + (w_k - w_0) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \Delta T_i \right)^u \quad (3)$$

gdzie: w_k – wskaźnik stępienia.

Przedstawiony, prosty podział okresu zużycia należy stosować w przypadku obróbki konwencjonalnej, ustabilizowanej, przy stałych, niezmiennych warunkach skrawania.

W takich warunkach prowadzona jest często obróbka wierceniem, tokarska czy konwencjonalne frezowanie frezami walcowymi. W przypadku obróbki kształtowej, wykonywanej głównie narzędziami frezarskimi o kształcie sferycznym podział ten jest nieadekwatny. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest fakt, że frez kształtowy może pracować całą krawędzią lub tylko jej częścią zmieniając w trakcie pracy wielokrotnie głębokość skrawania. Tak duża zmienność parametrów geometrycznych i technologicznych cechująca ten rodzaj obróbki powoduje, że pomimo kilku lat intensywnych badań wiodących ośrodków naukowych, nadal brakuje spójnej teorii przedstawiającej ogół zjawisk zachodzących w strefie kontaktu ostrza z materiałem obrabianym. Dlatego, opis zależności pomiędzy geometrycznymi i fizykalnymi wskaźnikami zużycia jest rzeczą ważną. W takim przypadku należy więc, zastosować system monitorujący, który na podstawie ekstrakcji cech otrzymanego ze strefy skrawania sygnału pozwoli określić stopień zużycia ostrza.

4. Systemy monitorowania zużycia narzędzia skrawającego

Obecne na rynku systemy monitorowania stanu ostrza narzędzi skrawających są zróżnicowane i o różnej skuteczności. Stosowane w nich techniki monitorowania można podzielić na dwie grupy:

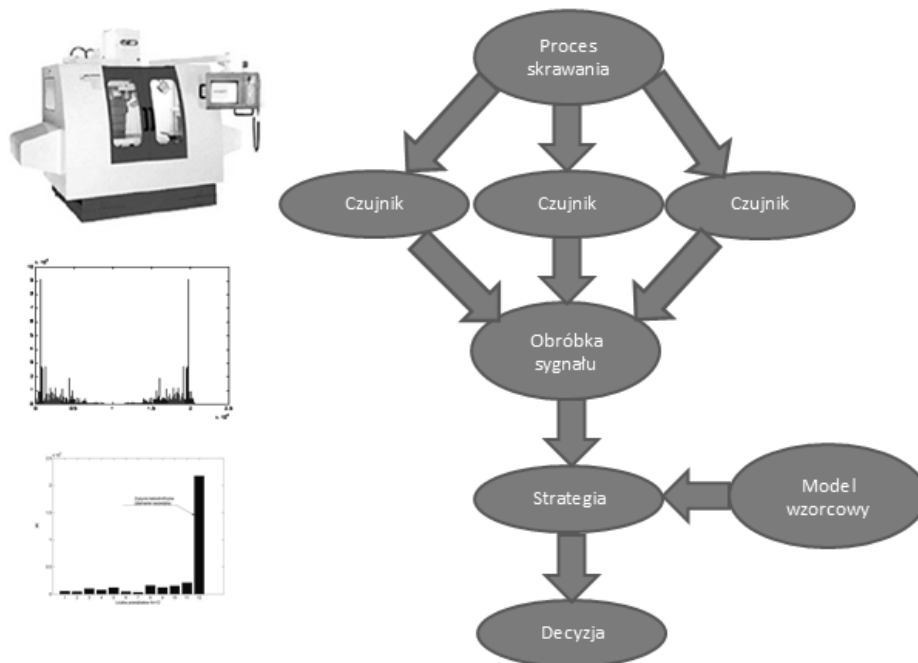
- metody bezpośrednie,
- metody pośrednie.

Metody bezpośrednie są trudne w zastosowaniu z powodu niedostępności obszaru skrawania podczas obróbki, mało skuteczne, czasochłonne i obciążone dużym błędem pomiarowym. Z tych powodów są stosowane sporadycznie. Do metod bezpośrednich należy zaliczyć, m.in. techniki optyczne, indukcyjne, elektrooporowe, radiometryczne czy pneumatyczne.

Większe zastosowanie w przemyśle mają metody pośrednie. Metody te są oparte na monitorowaniu zmiennych narzędzia i procesu skrawania za pośrednictwem sygnału, gdzie na podstawie analizy może zostać określony (prognozowany) stopień zużycia narzędzia. W metodach pośrednich uzyskujemy miarę sygnału wtedy, gdy narzędzie skrawające pracuje.

Metody pośrednie opierają się, więc na pomiarach skutków zużycia, a nie samego zużycia. Cechuje je prostsza technicznie estymacja cech zużycia, niż w przypadku metod bezpośrednich, ale wyniki są obciążone niepewnością wynikającą z nie do końca rozpoznanych zjawisk zachodzących w strefie skrawania, szczególnie podczas frezowania profilowego. Do oceny zużycia ostrza metodą pośrednią najczęściej wykorzystywany jest pomiar takich wielkości fizycznych jak: siły skrawania (statyczna i dynamiczna), emisja akustyczna (50 – 400 kHz), temperatura skrawania lub wynikająca z niej siła termoelektryczna, drgania (1 – 10 kHz), odkształcenia plastyczne narzędzia czy moc skrawania.

Metody pośrednie, w odróżnieniu od bezpośrednich, wymagają dwustopniowych działań: pomiaru określonej wielkości fizycznej i opracowania odpowiedniej zależności pozwalającej na wnioskowanie o stanie narzędzia na podstawie dokonanego pomiaru. Typowy, najczęściej spotykany algorytm estymacji cech zużycia w metodzie pośredniej przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Struktura układu monitorowania narzędzi i procesu skrawania w metodzie pośredniej

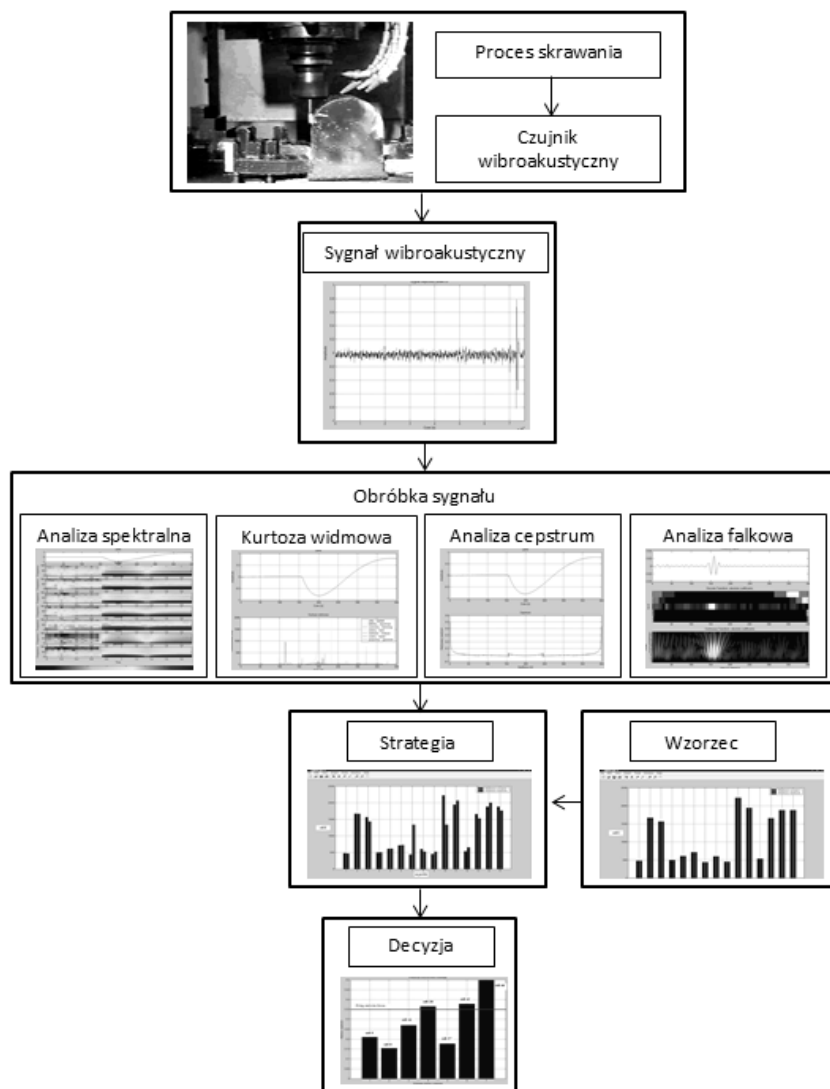
W metodzie pośredniej, przedstawiona powyżej struktura, wykorzystywana jest niemal we wszystkich współczesnych systemach monitorowania. Strategia wieloczujnikowa ma szereg zalet, np. pomiar szerokiego spektrum różnych wielkości fizycznych, ale i wad, z których najważniejsze to złożona budowa, wysokie koszty, estymacja cech sygnału z kilku czujników oraz niepewność poprawnej pracy. Z tego też względu, taka strategia jest odpowiednia do badań laboratoryjnych. W zastosowaniach przemysłowych od układów monitorowania należy oczekiwać prostoty działania, łatwości implementacji na obrabiarce, łatwości obsługi, a przede wszystkim efektywności. Układem spełniającym powyższe wymagania wydaje się być układ bazujący na jednym czujniku, szczególnie czujniku drgań.

W celu zwiększenia skuteczności działania systemów monitorowania jednoczujnikowych, otrzymany sygnał należy poddać analizie przy zastosowaniu różnych technik przetwarzania sygnałów. Wynikiem ekstrakcji, jest szereg wektorów cech, które reprezentują sygnał pomiarowy, wrażliwy na zmiany parametrów badanego procesu. Na podstawie tak uzyskanych wektorów cech i odpowiedniej strategii, generowana jest decyzja o stanie monitorowanego narzędzia. W dobie intensywnego rozwoju technik informatycznych analiza sygnału kilkoma różnymi metodami nie nastręcza zbyt wielu problemów.

Układ monitorujący – prognozujący z jednym czujnikiem drgań dedykowany do kształtowej obróbki frezami kulistymi i spełniający kryteria przedstawione powyżej został opracowany i przetestowany w warunkach laboratoryjnych. Podstawą do opracowania systemu, było stanowisko badawcze, którego schemat strukturalny przedstawiono w pracy [10].

Obróbkę prowadzono na trzyosiowej frezarce o sterowaniu numerycznym przy różnych, ustalonych parametrach skrawania. W programie sterowania obrabiarką uwzględniono specyfikę pracy frezu kulistego (wznios i spadek, prace czolem).

W wyniku badań laboratoryjnych otrzymano szereg przebiegów sygnału wibroakustycznego w funkcji czasu, które zostały poddane analizie. Algorytm estymacji cech zużycia przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Algorytm estymacji cech zużycia sygnału wibroakustycznego

W celu uzyskania algorytmu efektywnej analizy i kompresji danych pomiarowych jednego sygnału zużycia dokonano połączenia różnych technik cyfrowego przetwarzania sygnałów. Połączenie metod statystycznych z technikami grupowania, pozwoliło nie tylko na wiarygodną detekcję uszkodzeń, ale również na ich bardziej precyzyjną klasyfikację.

Wysoką wiarygodność klasyfikacji zapewniły techniki przetwarzania sygnałów, tj. specgram, kurtoza widmowa, cepstrum i transformacja falkowa.

Analiza specgram umożliwiła rozpoznanie całościowego stanu zużycia frezu przy zastosowaniu trzech okien: naturalnego stępienia ostrza – okno Hamminga, wykruszenia ostrza – okno Blackmanna, złamania frezu – okno Czebyszewa. Zastosowanie kurtozy widmowej i cepstrum wykazało bardzo zbliżone do siebie wyniki lecz ich praktyczne wykorzystanie ze względu na dość skomplikowaną procedurę obliczeniową nie jest możliwe w warunkach przemysłowych. Badania prowadzone z wykorzystaniem metody analizy falkowej wykazały, że dzięki nie obcinaniu pasma sygnału, umożliwia ona pełną identyfikację zużycia. Szczegółowe wyniki badań przedstawiono w pracy [13].

Zwiększoną skuteczność systemu monitorującego – prognozującego uzyskano przez wprowadzenie (elementów) sieci neuronowych typu wielowarstwowy perceptron MLP o strukturze trójwarstwowej z jedną warstwą ukrytą składającą się z 20 neuronów, które uczono algorytmem propagacji wstecznej z liniową funkcją aktywacji. Po nauczaniu sieci, to znaczy po osiągnięciu kryterium 5% błędu względnego, dokonywano porównania sygnału pomiarowego z wzorcowym. Zastosowana sieć neuronowa pozwoliła na znaczne zwiększenie dokładności wartości prognozy.

W przyszłość, od systemów monitorowania, diagnozowania i prognozowania stanu narzędzi skrawających należy oczekiwać pełnej integracji z szeroko pojętymi systemami komputerowego wspomaganie produkcji. Dlatego rzeczą ważną jest opracowanie prostego a zarazem skutecznego układu, składającego się z modułów ułatwiających implementację w istniejące zintegrowane systemy zarządzania przedsiębiorstwem, spełniającego oczekiwania użytkowników szczególnie z sektora małych i średnich przedsiębiorstw.

5. Podsumowanie

Naczelną ideą przyświecającą dzisiejszym zakładom produkcyjnym z sektora małych średnich przedsiębiorstw jest dążenie do zwiększania produkcji, przy możliwie najniższych kosztach. Jednym ze skutecznych sposobów uzyskania tego celu jest odpowiednia gospodarka narzędziowa. Gospodarka narzędziowa może być realizowana poprzez wprowadzenie do produkcji przemysłowej, skutecznych a zarazem bardzo prostych układów monitorowania. Przedstawiony w artykule, laboratoryjny układ monitorowania stanu ostrza skrawającego frezu kulistego wydaje się być skutecznym i obiecującym systemem w realizacji tak postawionego celu. W chwili obecnej trwają prace nad rozbudową systemu poprzez zastosowanie nowych technik estymacji cech sygnału oraz implementacją programową układu celem testowania i wykorzystania w rzeczywistych, przemysłowych warunkach pracy.

Literatura:

1. 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.
2. Cichosz P. , Kuzinovski M. Ekonomiczne aspekty doboru narzędzi skrawających do zadania produkcyjnego W: Obróbka skrawaniem. T.1. Wysoka produktywność, P. Cichosz (red.) Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007
3. Technologia obróbki skrawaniem. Poradnik obróbki skrawaniem Sandvik Coromant 2010.

4. Darlewski J.: Tendencje rozwojowe narzędzi do obróbki wiórowej, *Mechanik*, 1994, nr 1.
5. Toenshoff H. K., Wulfsberg J. P., Kals H. J. J., Van Luttervelt C. A.: Development and trends in monitoring and control of machining processes, *Annals of CIRP* 37 (2), 611 – 622, 1988.
6. Cichosz P.: Nowoczesne narzędzia skrawające i oprzyrządowanie, *Prace naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji PWr.*, Wrocławskie sympozjum – Automatykacja Produkcji, Innowacje w Technice i Zarządzaniu, Wrocław 1997.
7. Schulz H., Moriwaki T.: High – speed machining, *Annals of the CIRP*, 1992, t. 41, nr 2, s. 637 – 642.
8. Jemielniak K.: Automatykzna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawaniem, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2002.
9. Krzysztof Jemielniak, *Obróbka skrawaniem*, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 1998.
10. Wittbrodt P.: Spherical carbide cutters natural wear during milling process. *Przegląd Mechaniczny*, nr 6/2007.
11. Wittbrodt P.: Life and Wear of Monolithic Carbide Mills. *Eksploatacja i Niezawodność* Nr 3/2005.
12. PN – ISO 8688 – 1: 1996 oraz PN – ISO 8688 – 2: 1996.
13. Wittbrodt P., Paszek A., Algorytmy samouczące w zastosowaniu do technologicznych systemów prognozujących proces obróbki frezowaniem. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna „Technologiczne Systemy Informacyjne w Inżynierii Produkcji i Kształceniu Technicznym”, 5-8.06.2013., Kazimierz Dolny.

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