

WYBRANE ZAGADNIENIA DIAGNOSTYKI PROCESÓW OBRÓBKI SKRAWANIEM

Piotr WITTBRODT, Iwona ŁAPUŃKA

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono wybrane zagadnienia związane z problematyką diagnostyki procesów obróbki skrawaniem, ze szczególnym uwzględnieniem problemów diagnostyki procesów zużycia narzędzi skrawających. Przedstawiono i omówiono typowy tor pomiarowy stosowany w diagnostyce procesów obróbki. Prezentowany artykuł ma charakter teoretyczny. Forma dydaktyczna referatu ma na celu przybliżenie zagadnień eksploatacyjnych procesów wytwórczych w inżynierii produkcji.

Słowa kluczowe: diagnostyka, procesy wytwórcze, zużycie narzędzia skrawającego

1. Wstęp

Współczesny rynek charakteryzuje się globalizacją i silną presją ze strony konkurencji. Wymusza to na przedsiębiorstwach produkcyjnych, głównie z branży wytwórczej, na wytwarzanie wyrobów w najniższych cenach, w krótszym czasie przy tym samym poziomie jakości wyrobów. Tendencjom towarzyszy wzrost oczekiwań klientów do terminowości zleceń produkcyjnych jak również możliwość realizacji ich indywidualnych wymagań. Aby sprostać wymaganiom powstają nowe koncepcje organizacyjne, np. [1], jak również techniczne, przeznaczone dla przedsiębiorstw produkcyjnych.

Przykładem zmian organizacyjnych przedsiębiorstwa, (szczególnie w małych i średnich organizacjach, funkcjonujących głównie w charakterze poddostawców) to dążenie do osiągnięcia wysokiego poziomu elastyczności procesów produkcyjnych [2, 3]. Przedsiębiorstwa, które wprowadzają model elastycznej produkcji, charakteryzują się wysokim poziomem reagowania na zmiany w harmonogramie produkcji, szybkim przystosowaniem procesów produkcyjnych do pożądaných warunków zachodzących w otoczeniu. Organizacja elastyczna, jest bardziej odporna na nieprzewidywalne zmiany zewnętrzne [4].

Podstawowym warunkiem opracowania koncepcji elastycznej produkcji jest wprowadzenie sterowanych numerycznie urządzeń wytwórczych CNC. Bazując na obrabiarkach CNC, powstało szereg rozwiązań, do których należy zaliczyć, np. elastyczne linie produkcyjne, elastyczne gniazdo produkcyjne, elastyczny oddział produkcyjny. Przedsiębiorstwa, które prowadzą elastyczną produkcję, cechują się rozwojem wewnętrznym pobudzającym innowacyjność.

Organizacje, które nie mogą wprowadzić elastycznej produkcji, np. ze względu na ograniczone środki finansowe, w zmianach technicznych upatrują szansy wzrostu konkurencyjności. Zmiany techniczne w procesach produkcyjnych przedsiębiorstw, ukierunkowane są na dwa główne nurty. Pierwszy z nich, to tendencja do optymalizacji kosztów produkcji z równoczesnym dążeniem do poprawy jakości produktu i skróceniu czasu wytworzenia wyrobu poprzez racjonalne wykorzystanie możliwości skrawających narzędzi i obrabiarek (najczęściej zwiększanie). Ze względu na ograniczenia konstrukcyjne i własności materiałów skrawających, zmiana ta ma swoje ograniczenia.

Drugi kierunek rozwoju przedsiębiorstw, to dążenie do osiągnięcia wysokiego poziomu niezawodności eksploatacyjnej systemu produkcyjnego. W przypadku systemu produkcyjnego przedsiębiorstwa, poziom niezawodności eksploatacyjnej kształtowany jest przez niezawodność wszystkich jego elementów składowych. W systemie produkcyjnym występuje znaczna ilość elementów składowych. Oszacowanie wartości niezawodności dla całej organizacji jest trudne i należy rozpatrywać indywidualnie ze względu na ich specyfikę. W systemie wytwórczym, szczególną uwagę należy zwrócić na niezawodność elementów biorących udział bezpośrednio w procesie obróbki, tj. na niezawodność obrabiarki [5] i ostrza skrawającego [6]. Miarą niezawodności tych elementów jest ciągłość pracy bez przerw związanych z awarią. Powód awarii może być różny, lecz najczęściej to przedwczesne zużycie narzędzia skrawającego spowodowane przez zbyt duże siły skrawania lub drgania, wzbudzone przez różną głębokość skrawania czy małą sztywność obrabiarki. Konieczność przerwania obróbki, wymiana na nowe, ostre narzędzie, konieczność ponownego ustawienia i pomiaru narzędzia powoduje, że strata czasu produkcyjnego jest znaczna. Szacuje się, że około 20% przestojów obrabiarek sterowanych numerycznie przypisana jest do uszkodzenia narzędzia. Powoduje to zmniejszenie wydajności i straty ekonomiczne przedsiębiorstwa.

W celu wzrostu niezawodności systemu obróbczego, opracowano wiele koncepcji diagnostyki i monitorowania procesu skrawania. W początkowym okresie ich stosowania (od końca lat 80 ubiegłego wieku), skuteczność układów diagnozy i monitorowania była niewielka, co było przyczyną małego zainteresowania ze strony przedsiębiorstw produkcyjnych. Niemniej jednak, ogromny postęp w dziedzinie software'u i hardware'u, pozwolił na nowo zainteresować ośrodki badawcze tą tematyką. Powstało wiele metod estymacji cech zużycia, technik przetwarzania sygnału jak również systemów decyzyjnych zwiększających poziom niezawodności układu. Prezentowany artykuł ma na celu przybliżyć wybrane zagadnienia z dziedziny diagnostyki eksploatacyjnej procesów wytwórczych w inżynierii produkcji.

2. Metody diagnostyki procesów wytwórczych

Duża zmienność procesów wytwórczych powoduje, że budowano modele matematyczne procesu skrawania w sposób uproszczony. Te modele, wykorzystywano do opracowania systemów diagnostyki eksploatacyjnej, skutkiem czego, przedsiębiorstwa produkcyjne nie były zainteresowane takimi rozwiązaniami. Zmiana podejścia do modelowania procesu wytwórczego na dedykowane, dla określonego procesu i danego przedsiębiorstwa, wymusiła opracowanie różnych metod diagnostyki.

Opracowane na przestrzeni lat, metody diagnostyki procesów wytwórczych, można zaliczyć do dwóch grup, do metod bezpośrednich i pośrednich. Metody bezpośrednie, ze względu na konieczność ingerencji w konstrukcję układu obrabiarka-narzędzie-uchwyt są wykorzystywane sporadycznie. W przypadku metod pośrednich, cechy i wartość zużycia definiuje się na podstawie symptomów określonych na podstawie sygnału eksploatacyjnego. Jak wspomniano we wstępie, znaczny rozwój technik komputerowych w dziedzinie software'u i hardware'u, przyczynił się do większego stosowania metod diagnostycznych. Obecnie przyjmuje się, że najczęściej wykorzystywanymi, użytecznymi cechami sygnałów eksploatacyjnych to obszary:

- emisji akustycznej,
- sił skrawania (statyczna i dynamiczna),
- drgań,
- inne (magnetyzm, ultradźwięk).

Rozwój metod diagnostycznych, z poszerzoną wiedzą na temat kinematyki prowadzonych procesów wytwórczych, prowadzi do opracowania i budowy inteligentnych systemów diagnostyki z funkcją predykcji.

2.1. Emisja akustyczna

Sygnal emisji akustycznej (AE) definiowany jest, jako przejściowa elastyczna fala wygenerowana przez szybkie uwolnienie energii ze zlokalizowanego źródła (źródeł) w materiale poddanym naciskom. Innym źródłem emisji akustycznej jest tarcie i łamanie wióra jak również tarcia między narzędziem i przedmiotem obrabianym, mikroskopijnymi deformacjami plastycznymi, zużyciem i złamaniem narzędzia. Ostatnia własność została wykorzystana do budowy układów diagnostycznych procesów skrawania.

Od lat 50 ubiegłego wieku, podejmowano próby wykorzystania sygnału emisji akustycznej do systemów diagnostyki procesów wytwórczych. Szereg prac naukowych np. [7 - 11] wykazały skuteczność tej metody do diagnostyki procesów wytwórczych, związanych głównie z diagnostyką stanu narzędzia skrawającego. Analiza literatury potwierdza, że wykorzystanie sygnału emisji akustycznej do diagnostyki narzędzia skrawającego ma znaczenie większe w obróbce toczeniem niż w procesie wiercenia czy frezowania, gdyż proces wiercenia i frezowania jest procesem nieciągłym, przerwany a impuls sygnału emisji akustycznej jest generowany podczas każdego wejścia i wyjścia ostrza do/z materiału obrabianego i może być uznany przez układ diagnostyczny jako symptom zużycia. Podjęto również próby łączenia emisji akustycznej z innymi metodami do diagnostyki stanu narzędzia skrawającego [np. 12, 13] w celu ograniczenia fałszywych „wybuchów” emisji akustycznej. Łączenie metod diagnostyki tworzy układ wieloczuJNIKOWY, który poprzez relację sygnałów emisji akustycznej i siły skrawania bądź emisji akustycznej i poboru mocy silnika, zwiększa jego skuteczność.

W dyskusji o wykorzystaniu sygnałów AE do diagnostyki technicznej, pojawiają się również głosy przeciwne [np. 14, 15]. Autorzy uważają, że sygnał emisji akustycznej niesie ze sobą informacje o niewielkiej użyteczności. Powodem jest brak pewności detekcji wszystkich rodzajów uszkodzeń narzędzia skrawającego oraz wrażliwość sygnału na warunki otoczenia (hałas z różnych źródeł w obszarze obrabiarki) i warunki skrawania. Istotne znaczenie na moc sygnału emisji akustycznej ma miejsce zamontowania czujnika, gdy odległość zwiększa się, moc sygnału jest mniejsza. Duże znaczenie ma również sam proces obróbki, gdyż od jego charakteru zależy jakość i trafność diagnozy.

Pomimo krytycznych uwag, należy zwrócić uwagę na pozytywne aspekty wykorzystania sygnału emisji akustycznej w procesach diagnostyki, do których należą czynniki: brak ingerencji w konstrukcję w celu zainstalowania czujników a zainstalowane czujniki nie ulegają zużyciu, użyteczny zakres częstotliwości sygnału emisji akustycznej jest wyższy niż drgania obrabiarki.

2.2. Siły skrawania

Siła skrawania jest ważną cechą charakteryzującą proces obróbczy a ich zmiana (zarówno statyczna i dynamiczna) bezpośrednio dotyczy warunków skrawania. Stopień zmienności siły skrawania w procesach obróbki, a szczególnie określenie wartości statycznych i dynamicznych sił skrawania, należy znać, gdyż znacząco wpływa to na stopień zużycie narzędzia jak i całej obrabiarki.

Duże zainteresowanie wykorzystaniem zmian wartości siły skrawania do diagnostyki procesów skrawania przypada na lata 80 i 90 ubiegłego wieku i w tym okresie powstało szereg opracowań i rozwiązań, mniej lub bardziej skutecznych (np. [16 - 18]). Wraz z rozwojem metod i technik analizy sygnałów powstały nowe opracowania systemów diagnostycznych (np. [19 - 21]), bazujące głównie na kilku technikach estymacji cech z sygnałów eksploatacyjnych. Przykładem takiego rozwiązania jest model przedstawiony w opracowaniu [22], gdzie diagnostykę stanu narzędzia realizowano w dwóch etapach. W pierwszym kroku, uzyskane z pomiarów siły skrawania zostały poddane redukcji/kompresji przy użyciu transformacji wavelet, natomiast w drugim, przy wykorzystaniu samouczącej się sieci neuronowej, uzyskane parametry były klasyfikowane, gdzie na ich podstawie oceniano stan zużycia narzędzia.

W zastosowaniach przemysłowych, pomiar sił skrawania ograniczony jest przez wady czujników pomiarowych, do których należy zaliczyć: koszt zakupu i instalacji, ingerencja w budowę maszyny zmniejsza sztywność układu prowadząc do niepożądanych drgań, wrażliwość na przeładowanie, mała wytrzymałość. Pomimo wad i małej skuteczności, w relacji wysoki koszt układu/efekt działania, wiele ośrodków naukowych na nowo rozwija metody i systemy monitorowania opartych na pomiarze sił podczas procesu skrawania. Podjęto próby ograniczenia obszaru zmian w konstrukcję obrabiarki, np. [23]. Pomiar sił skrawania oparto o składowe siły, uzyskane z pomiaru przy użyciu czujnika zainstalowanego na silniku posuwu.

2.3. Drgania

Drgania, to kolejny wskaźnik eksploatacyjny procesu skrawania. Generowane są przez okresowe siły skrawania i zdefiniowane, jako okres czasu przypadający na kontakt ostrza z materiałem obrabianym (drżania wymuszone) lub powstają z połączenia warunków skrawania, sił skrawania i naturalnych częstotliwości systemu obróbkowego (drżania samowzbudne).

Prace związane z wykorzystaniem drgań w diagnostyce procesów obróbki powstały w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. W pierwszym okresie badań dominował pogląd, że drżania można wykorzystać tylko do diagnostyki zjawisk katastroficznego zużycia narzędzia, np. [24 - 26]. Inne badania, np. [27 - 29] wykazały, skuteczność wykorzystania zjawiska drgań również do diagnostyki naturalnego zużycia. Wykorzystano w nich m. in. modele sieci neuronowej z logiką rozmytą.

Rozwijany przez ośrodki naukowe kierunek badań to systemy diagnostyki wieloczujnikowe. Przykładem takiego układu jest praca [30]. Autorzy połączyli technikę drgań narzędzia z metodą optyczną. Rozwinięcie układu o system optyczny zwiększyło skuteczność systemu poprzez eliminację „fałszywych” sygnałów otrzymanych z czujnika drgań.

Wzajemna zależność między wartością sygnału drgań i dynamicznym charakterem procesu skrawania, czyni ten parametr interesującym w rozwoju systemów diagnostycznych.

2.4. Pozostałe metody diagnostyki stanu

Do pozostałych metod monitorowania stanu narzędzia skrawającego, należy zaliczyć następujące techniki:

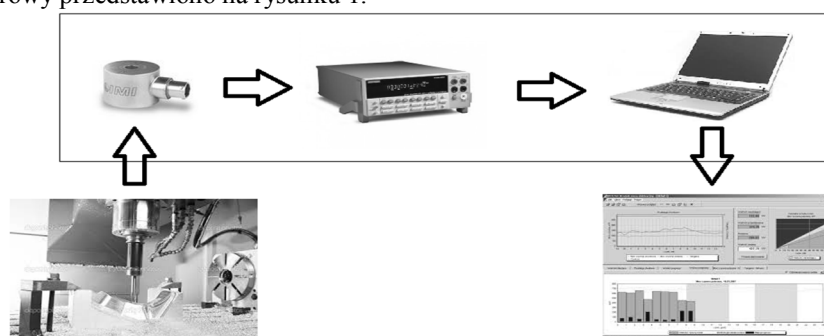
- magnetyzm,
- metody ultradźwiękowe.

W pracy [31] do diagnostyki stanu narzędzia zaproponowano wykorzystać zjawisko magnetyzmu. Metodę oparto na namagnesowaniu płytek skrawających, a następnie monitorowanie ich zmiennego pola magnetycznego jako wskaźnik ich zużycia. Rozważania autorów pozwoliły na opracowanie do badań wstępnych układu wykorzystującego zjawisko magnetyzmu. Analiza uzyskanych wyników dowiodła, że istnieje możliwość dokładnej predykcji końca okresu trwałości narzędzia a moment złamania dokonać „on-line” przez obserwację strumienia magnetycznego. Ze względu na małe koszty związane z adaptacją układu diagnostyki na obrabiarkę, system ma potencjał implementacji w wielu środowiskach przemysłowych.

Wykorzystanie metody ultradźwiękowej do diagnostyki technicznej narzędzia zaproponowano w pracy [32]. Podstawą techniki było celowo zaprojektowane narzędzie, w którym umieszczono przetwornik ultradźwiękowy do pomiaru stopniowego zużycia powierzchni przyłożenia i głównej krawędzi skrawającej. Analiza opierała się na porównaniu zarejestrowanych przebiegów nowego i częściowo zużytego narzędzia. Analiza wyników wykazała zadawalający poziom korelacji między zmierzonymi wartościami zużycia a zmianami fali ultradźwiękowej. Ponieważ, opracowany system wymaga specjalistycznych narzędzi rejestracji fal ultradźwiękowych i ich przetwarzania, koszty budowy komercyjnego układu są znaczne. Uniemożliwia to stosowanie tej metody na skalę przemysłową.

3. System diagnostyczny procesu skrawania

System diagnostyczny składa się z kilku podstawowych elementów. Typowy układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Typowy układ pomiarowy sygnału zużycia narzędzia w procesie skrawania

W skład typowego toru pomiarowego, należy zaliczyć: czujnik, przetwornik analogowo – cyfrowy oraz komputer z zaimplementowanym oprogramowaniem analizy danych. W momencie, gdy jest potrzeba diagnostyki kilku elementów, tor pomiarowy można rozbudować tworząc układ wieloczujnikowy.

3.1. Czujniki do monitorowania stanu narzędzia

Podczas procesów wytwórczych, należy dokonać rejestracji wartości symptomów zużycia. Z tych względów opracowano szereg czujników, dla których przyjęto typowy podział:

- pomiaru bezpośredniego:

- optyczny – pomiar polega na porównaniu zużycia (powierzchni lub krawędzi) do wzorca (powierzchni lub krawędzi nowego ostrza skrawającego), w celu określenia wartości cech geometrycznych narzędzia świadczących o jego zużyciu,
- zbliżeniowy – wartość zużycia narzędzia definiuje się poprzez pomiar zmiany odległości między krawędzią narzędzia i przedmiotu obrabianego w sposób elektryczny lub pneumatycznych (np. sonda pomiarowa),
- pomiaru pośredniego:
 - emisji akustycznej – uzyskany sygnał zawiera w widmie szereg zakłóceń (np. szum pochodzący od pracującej obrabiarki), które należy poddać analizie w celu wyodrębnienia użytecznego sygnału eksploatacyjnego,
 - drgań – ze wzrostem zużycia narzędzia, zwiększa się poziom siły skrawania, generując drgania, które są nośnikiem informacji o stanie narzędzia skrawającego,
 - sił skrawania – wzrost siły skrawania jest wynikiem większego oporu tarcia zużytego narzędzia o powierzchnię obrabianą.

Wykorzystując czujniki mierzące stan narzędzia w sposób bezpośredni, dokonujemy pomiaru zmian wartości parametrów geometrycznych narzędzia skrawającego. To zaleta pomiaru bezpośredniego, gdyż otrzymujemy stan rzeczywisty zmian geometrycznych wynikających ze zużycia narzędzia. Niemniej jednak, pomiary bezpośrednie są bardzo trudne do zrealizowania w trakcie trwania procesu w warunkach przemysłowych, z powodu ciągłego kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym (szczególnie trudne dla wiertła lub frezu), a niemożliwe do realizowania ze względu na obecność płynów chłodzących.

Czujniki do pomiaru pośredniego, pozwalają dokonać pomiaru wartości pośrednich zużycia. Nie wymagają kosztownych zmian w instalacji produkcyjnej, co przekłada się na znaczne stosowanie w przemyśle.

Przedstawione czujniki nie są wzajemnie elementami się wykluczającymi. Filozofia łączenia kilku czujników w celu zwiększenia predykcji niezawodności narzędzi skrawających jest stosowana. Ideą tego podejścia jest fakt, że im więcej danych uzyskanych z czujników, tym diagnoza zużycia narzędzia jest pewniejsza. Obecny trend minimalizacji, zmienia podejście na rzecz układów jednoczujnikowych. Oceniono, że porównywalny poziom niezawodności eksploatacyjnej narzędzia można uzyskać z jednego czujnika ekstrahując sygnał wieloma metodami.

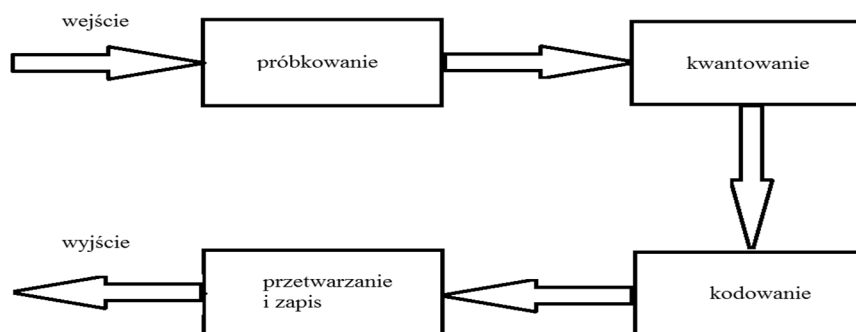
Czujniki do diagnostyki stanu procesu muszą spełniać wymagania, do których zaliczono [33]:

- lokalizacja możliwie blisko miejsca prowadzenia obróbki,
- brak ingerencji w budowę obrabiarki (ingerencja w budowę obrabiarki prowadzi do zmniejszenia jej sztywności statycznej i dynamicznej),
- brak ograniczeń pomiaru wartości parametrów skrawania (np. obróbka szybkościowa),
- odporność na zużycie,
- odporność na zabrudzenia i działanie czynników mechanicznych, elektromagnetycznych i cieplnych,
- bezobsługowa praca,
- niskie koszty zakupu i eksploatacji,
- niezawodna transmisja sygnału.

Z powodu dużych wymagań, tylko część czujników oferowanych na rynku, ma zastosowanie przemysłowe.

3.2. Przetwornik analogowo – cyfrowy

Przetworniki analogowo – cyfrowe (A/C) mają za zadaniem przetwarzanie sygnału analogowego na równoważny mu sygnał cyfrowy. Jest to układ elektroniczny, który zamienia wartości wielkości analogowej (ciągłej) na wartość cyfrową (dyskretną - kwantowaną), w określonych momentach czasu (próbkowaną - dyskretną w czasie). Na rysunku 2 przedstawiono proces zamiany wielkości analogowej na cyfrową.



Rys. 2. Proces zamiany wielkości analogowej na cyfrową

Wśród klasycznych rozwiązań przetworników A/C można wyróżnić trzy podstawowe kategorie:

- kompensacyjne, w których napięcie wejściowe jest porównywane przez układ komparatora z napięciem wyjściowym C/A, stosowanego jako wzorzec (dokładność przetwarzania jest mała i zwykle nie przekracza 16 bitów),
- całkujące, w których dokonuje się porównania ładunku zgromadzonego w kondensatorze podczas całkowania napięcia wejściowego z ładunkiem zgromadzonym w tej samej pojemności całkującej (cechują się dużą dokładnością i rozdzielczością, nieosiągalną w innym metodach przetwarzania A/C),
- z bezpośrednim porównaniem równoległym, napięcie wejściowe jest porównywane jednocześnie ze wszystkimi możliwymi poziomami kwantowania, a następnie wynik tego porównania jest bezpośrednio zakodowany w postaci n-bitowego słowa (wyróżniają się bardzo dużą szybkością przetwarzania).

Cechą charakterystyczną każdego przetwornika A/C są parametry określające ich dokładność i szybkość przetwarzania. Te cechy są ograniczone przez błędy powstające w procesie przetwarzania. Do błędów przetworników A/C, należy zaliczyć błędy analogowe i cyfrowe, które wynikają z charakteru samego przetwornika. Najczęściej spotykane błędy: nieliniowość całkowa, błąd kwantyzacji (szum kwantyzacji), błąd skalowania (błąd wzmocnienia) czy rozdzielczość przetwornika (liczba bitów słowa wyjściowego). Do pozostałych cech przetwornika A/C o charakterze eksploatacyjnym należy zaliczyć: maksymalny zakres i polaryzacja napięcia wejściowego, impedancja wejściowa czy rodzaj zasilania.

Pozyskany z przetwornika A/C sygnał eksploatacyjny w postaci cyfrowej, poddawany jest dalszej obróbce.

3.3. Analiza danych pomiarowych

Nieustanny rozwój oraz stale rosnąc poziom wykorzystania technik komputerowych, spowodował pojawienie się różnorodnych metod obróbki sygnałów eksploatacyjnych.

Wybór metody analizy oraz wybór cech sygnału, ocenianych (wyznaczanych) w wyniku analizy należy dobrać odpowiednio do celu badań i klasy sygnału.

Ogólnie, analiza sygnału eksploatacyjnego polega na przedstawieniu w bardziej „przydatnej” postaci za pomocą bazy przestrzeni, do której ten sygnały należą (rozkład na składniki/czynniki). Analiza sygnałów ma na celu wydobycie użytecznych informacji zawartych w sygnale. Pod pojęciem analizy sygnałów najczęściej rozumie się analizę częstotliwościową.

Wiele metod analizy sygnału eksploatacyjnego powoduje, że trudno podać ich jednoznaczny podział. Należy przyjąć, że podstawowy, klasyczny podział metod analizy sygnału ze względu na dziedzinę wykonywanej operacji (czas, częstotliwość, czas – częstotliwość) to:

- analiza czasowa (badanie cech sygnału w dziedzinie czasu),
- analiza częstotliwościowa,
- analiza czasowo – częstotliwościowa,
- analiza korelacyjna,
- analiza statystyczna (modele losowe).

Metoda czasowa wizualizacji sygnału stanowi bazę wszystkich innych metod, gdyż pierwotny sygnał jest zawsze dostępny w postaci czasowej.

Modyfikacją metody czasowej, a obecnie najczęściej wykorzystywaną metodą analizy sygnału, jest metoda czasowo – częstotliwościowa, która umożliwia równoczesne przedstawienie struktury czasowej i częstotliwościowej sygnału. Metoda ta jest oparta na trójwymiarowym widmie sygnału (przebieg czasowo – częstotliwościowy, spektrogram dynamiczny lub wideogramem). Szczegółowość tej metody to jej zaleta, gdyż jakość uzyskiwanych obrazów jest wysoka, ale również wadą, ponieważ duża liczba szczegółów utrudnia interpretacje wyników. Uproszczony podział metod analiz czasowo – częstotliwościowej sygnału wyróżnia metody [34]:

- parametryczne (np. modele: MA, AR, Prony, SVD),
- nieparametryczne:
 - liniowe (np. transformata Fouriera, transformata wavelet, transformata S),
 - nieliniowe (klasa Cohena np. Wigner, Wigner-Ville; klasa Boashasha-O’Shea’ego).

Z powodu braku ogólnie dostępnych czujników o wyjściu cyfrowym zachodzi potrzeba stosowania technik mieszanych, w których bezpośrednim wynikiem obserwacji jest sygnał analogowy, następnie przetwarzany technikami cyfrowymi.

Całkowita niepewność toru pomiarowego zależy od niepewności poszczególnych jego elementów, tj. czujnika i przetwornika analogowo – cyfrowego. Niepewność toru pomiarowego jest sumą geometryczną wymienionych elementów obejmującą błędy systematyczne oraz przypadkowe.

4. Podsumowanie

Ze względu na ograniczoną objętość artykułu, w sposób zwięzły przybliżono wybrane zagadnienia diagnostyki eksploatacyjnej systemów produkcyjnych. Przedstawiono najważniejsze informacje, podano podstawy, które poprzez podaną literaturę mogą być rozszerzone.

Przedstawiona w artykule problematyka jest wciąż aktualna i należy się spodziewać jej dalszego, intensywnego rozwoju. Zastosowanie w diagnostyce elementów sztucznej inteligencji, w szczególności w obszarach decyzyjnych, może się przyczynić do powstania interesujących, innowacyjnych rozwiązań przemysłowych.

Literatura

1. Zawadzka L., Współczesne problemy i kierunki rozwoju elastycznych systemów produkcyjnych, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2007.
2. Świć A., Taranienko W. Projektowanie technologiczne elastycznych systemów produkcyjnych. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003.
3. Stamirowski, J., Elastyczność systemów produkcyjnych w kontekście dynamiki produkcji, Postępy Nauki i Techniki, nr 9, 2011.
4. Kasiewicz S., Ormińska J., Rogowski W., Urban W., Metody osiągnięcia elastyczności przedsiębiorstw, Oficyna Wydawnicza SGH, Warszawa 2009.
5. Żółtowski B., Landowski B., Przybyliński B., Projektowanie eksploatacji maszyn, Radom – Bydgoszcz, 2012.
6. Teti R., Jemielniak K., O'Donnell G., Dornfeld D., Advanced monitoring of machining operations, CIRP Annals-Manufacturing Technology 59 (2), 2010.
7. Grbec P., Leskovic P., Acoustic emission of a cutting process, Ultrasonics 15 (1), pp. 17 – 20, 1977.
8. Jemielniak K., Otman O., Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals, Journal of Material Processing Technology 76, pp. 192–197, 1998.
9. Hutten D. V., Hu F., Acoustic emission monitoring of tool wear in end milling using time-domain averaging, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME 121, pp. 8 – 12, 1999.
10. Li X., A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42, pp. 157 – 165, 2002.
11. Kuljanic E., Sortino M., TWEM, a method based on cutting forces monitoring tool wear in face milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, pp. 29 – 34, 2005.
12. Wilcox S. J., Reuben R. L., Souquet P., The use of cutting force and acoustic emission signals for the monitoring of tool insert geometry during rough face milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture Vol. 37, No. 4, pp. 481 – 494, 1997.
13. Haili W., Hua S., Ming C., Dejin H., On – line tool breakage monitoring in turning, Journal of Materials Processing Technology 139, pp. 237 – 242, 2003.
14. 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), pp. 611 – 622, 1988.
15. Susanto V., Chen J. C., Fuzzy logic based in-process tool-wear monitoring system in face milling operations. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 3, pp. 186–192, 2003.
16. Lee L. C., Lee K. S., Gan C. S., On the correlation between dynamic cutting force and tool wear, International Journal of Machine Tools and Manufacture 29 (3), pp. 295–303, 1989.
17. Bayramoglu M., Dungal U., A systematic investigation on the use of force ratios in tool condition monitoring for turning operations, Trans. Institute of Measurement and Control 20 (2), pp. 92–97, 1998.
18. Dimla D. E., Tool wear monitoring using cutting force measurements, in: 15th NCMR: Advances in Manufacturing Technology XIII, University of Bath, 6–8 September, pp. 33–37, 1999.

19. Dimla D. E., Lister P. M., On-line metal cutting tool condition monitoring-I: Force and vibration analyses, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (5), pp. 739–768, 2000.
20. Zhang L., Zheng L., Prediction of cutting forces in milling of circular corner profiles. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44, pp. 225 – 235, 2004.
21. Cus F., Milfelner M., Balic J., An intelligent system for monitoring and optimization of ball – end milling process. *Journal of Materials Processing Technology* 175, pp. 90 – 97, 2006.
22. Tansel I. N., Mekdeci C., Mclaughlin C., Detection of tool failure in end milling with wavelet transformations and neural networks (WT – NN), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 35, Issue 8, Pages 1137 – 1147, August 1995.
23. Li X., Venuvinod P. K., Chen M. K., Feed cutting force estimation from current measurement with hybrid learning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 16, pp. 859 – 862, 2000.
24. Lee J. M., Real – time tool breakage monitoring for NC milling process, *Annals of the CIRP* 44 (1), pp. 59 – 62, 1995.
25. Dimla D. E., Multivariate tool condition monitoring in a metal cutting operation using neural networks. Ph.D. thesis, School of Engineering and the Built Environment, The University of Wolver Hampton, UK, 1998.
26. Li H., Li X., Modelling and simulation of chatter in milling using a predictive force model, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40, pp. 2047 – 2071, 2000.
27. Jiang C. Y., Zhang Y. Z., Xu H. J., In-process monitoring of tool wear stage by the frequency band-energy method, *Annals of the CIRP* 36 (1), pp. 45–48, 1987.
28. Dan L., Mathew J., Tool wear and failure monitoring techniques for turning—a review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 30 (4), pp. 579–598, 1990.L
29. Li X., Dong S., Venuvinod P. K., Hybrid Learning for Tool Wear Monitoring, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 16, pp. 303 – 307, 2000.
30. Bahr B., Motavalli S., Arfi T., Sensor fusion for monitoring machine tool Conditions, *International Journal Compute Integrated Manufacturing*, vol. 10, no. 5, 314 – 323, 1997.
31. Jetley S. K., Gollajesse A., Measuring tool wear using magnetism, in: *Proceedings: Japan–USA Symposium Flexible Automation - A Pacific Rim Conference*, July 11–18, Kobe, Japan, pp. 345–347, 1994.
32. Abu-Zahra N. H., Nayfeh T. H., Calibrated method for ultrasonic on-line monitoring of gradual wear during turning operations, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37 (10), 1475–1484, 1997.
33. Tonshoff, H. K., Wulfsberg, J. P., Kals, H. J. J., Konig, W., Van Luttervelt, C.A., Development and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes, *Annals CIRP*, 37 (2), pp. 611-622, 1988.
34. Zieliński T.: *Reprezentacje sygnałów niestacjonarnych typu czas – częstotliwość i czas – skala*, *Rozprawy monograficzne* 10, Wydawnictwa AGH, Kraków 1994.

Dr inż. Piotr WITTBRODT

Dr inż. Iwona ŁAPUŃKA

Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów, Politechnika Opolska

45 – 370 Opole, ul. Ozimska 75

tel.: (+48 77) 449 88 45, 449 88 50

e-mail: p.wittbrodt@po.opole.pl, i.lapunka@po.opole.pl