

Aktywne systemy monitorowania procesu skrawania dla Przemysłu 4.0

Active systems for monitoring the cutting process in the Industry 4.0 concept

PIOTR SZULEWSKI
DOMINIKA ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA
MIROSLAW NEJMAN*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.3.34>

Omówiono wybrane rozwiązania techniczne związane z coraz bardziej popularnymi systemami monitorowania i nadzorowania procesu obróbki skrawaniem. Przedstawiono podstawowe czujniki oraz elementy toru pomiarowego odpowiedzialne za kondycjonowanie pozyskiwanych sygnałów. Podano analityczną strategię unikania drgań samowzbudnych. Wskazano dostępne na rynku rozwiązania komercyjnych systemów monitorowania i ich możliwości.

SŁOWA KLUCZOWE: monitorowanie obrabiarek, nadzorowanie obrabiarek, drgania, czujniki, obróbka sygnałów

The paper illuminates and discusses selected technical solutions related to increasingly popular systems for monitoring and supervising the machining process. The basic sensors and elements of the measurement path responsible for conditioning the acquired signals are presented. An analytical strategy for self-excited vibrations is given. The solutions of commercial monitoring systems and their capabilities available on the market are indicated.

KEYWORDS: machine-tools monitoring, machine-tools supervision, vibrations, sensors, signal conditioning

W czasach, kiedy rynek klienta wymaga (wręcz żąda), by producenci oferowali produkty w szerokiej gamie, ale spersonalizowane i w co najmniej przystępnych cenach, konieczne jest powszechne wprowadzenie do produkcji oraz zarządzania technik informatycznych. Promowana idea Industry 4.0 (będąca konglomeratem technologii, systemowości i technik cyfrowych) nie ogranicza się do stworzenia unikalnej struktury produkcji opartej na „wyspach cyfrowej automatyzacji”. Do jej realizacji konieczne jest przyjęcie holistycznego sposobu myślenia, który – wraz z systematycznie wprowadzaną cyfryzacją – zrewolucjonizuje produkcję [1]. Będzie to możliwe jedynie pod warunkiem zapewnienia pełnej komunikacji pomiędzy obrabiarkami i maszynami technologicznymi, przy założeniu, że każda z nich dysponuje niezależnym systemem monitorowania swojego stanu oraz realizowanego procesu. Oznacza to, że należy dążyć do sytuacji, kiedy każdy z komponentów obrabiarki ma wbudowaną inteligencję oraz zestaw czujników, który umożliwi mu efektywne współuczestniczenie w procesie aktywnego monitorowania wytwarzania [2].

W szeroko pojmowanej obróbce skrawaniem (obejmującej toczenie, frezowanie, wiercenie) spośród wielu zjawisk mających niekorzystny wpływ na efekt finalny (przed-

miot obrabiany) jako szczególnie uciążliwe postrzegane są drgania układu OUPN (obrabiarka–uchwyt–przedmiot obrabiany–narzędzie).

Można wyróżnić trzy niezależne strategie mające na celu unikanie występowania niekorzystnych drgań podczas obróbki skrawaniem. Są to:

- dobór parametrów skrawania z uwzględnieniem granicy stabilności,
- wykrywanie drgań samowzbudnych i aktywna (online) modyfikacja parametrów skrawania (sterowanie adaptacyjne),
- stosowanie nowych materiałów, narzędzi lub podzespołów obrabiarek o specjalnej konstrukcji, umożliwiających zmniejszenie ryzyka wystąpienia drgań lub warunkujących skuteczne ich tłumienie.

Akwizycja sygnałów i ich zastosowanie do monitorowania

Szereg czynników wywiera wpływ na proces obróbki skrawaniem. Można określić cztery główne ich źródła, a mianowicie:

- przedmiot obrabiany: rodzaj materiału, geometria, twardość, struktura powierzchni, masa, podatność cienkich ścianek,
- obrabiarka: sposób mocowania przedmiotu, struktura kinematyczna maszyny, chłodziwo, stan techniczny, temperatura, sztywność wrzeciona,
- narzędzie: geometria, rozmiar, powłoka, materiał skrawający, prędkość obrotowa, posuw, stan ostrza, wysięg,
- środowisko: błędy programowania, złe operacje obróbkowe, reakcje operatora.

Właśnie ze względu na wieloparametrowość i złożoność procesu skrawania, aby uzyskać optymalne warunki jego realizacji, konieczne jest zastosowanie aktywnych form monitorowania parametrów procesu i stanu narzędzia [2]. Celem jest zapewnienie szybkiej reakcji na niespodziewane problemy. Wynikiem jest znaczne zwiększenie produktywności i efektywności wykorzystania obrabiarki, maksymalizacja dopuszczalnych posuwów, skrócenie cyklu obróbkowego, poprawa jakości obróbki, wydłużenie czasu pracy narzędzia, optymalizacja parametrów skrawania i stały nadzór nad bezpieczeństwem maszyny. Dodatkowo skracają się przestoje, oszczędzana jest energia, a koszty utrzymania i serwisowania obrabiarki ulegają redukcji. Unika się konieczności poprawek lub ponownej obróbki przedmiotu oraz ryzyka wyprodukowania przedmiotu poza granicami narzuconych tolerancji [3]. W tabl. II zestawiono obecne możliwości zdanego nadzoru nad obrabiarką, narzędziem, przedmiotem i procesem.

* Dr inż. Piotr Szulewski (maxer@cim.pw.edu.pl), dr inż. Dominika Śniegulska-Grądzka (dominika.gradzka@pw.edu.pl), dr inż. Mirosław Nejman (m.nejman@zaeios.pw.edu.pl) – Instytut Techniki Wytwarzania Politechniki Warszawskiej

TABLICA I. Zakresy monitorowania obrabiarki i procesu [4]

Monitorowanie	Toczenie	Frezowanie/wiercenie	Gwintowanie
Narzędzie	Złamanie Zużycie ostrza Brak narzędzia Złe narzędzie Nieosiowe mocowanie narzędzia w oprawce	Złamanie Zużycie ostrza Brak narzędzia Złe narzędzie Niewyrównoważenie Nieosiowe mocowanie narzędzia w oprawce	Złamanie Zużycie ostrza Brak narzędzia Złe narzędzie Odchyłka głębokości gwintu Nieosiowe mocowanie narzędzia w oprawce
Proces	Moment obrotowy wrzeciona Siła poosiowa Drgania wrzeciona Wydatek chłodziwa Prędkość obrotowa wrzeciona Zmiany wprowadzane przez operatora Stan przedmiotu obrabianego Temperatura Siła skrawania	Moment obrotowy wrzeciona Siła poosiowa Drgania wrzeciona Wydatek chłodziwa Prędkość obrotowa wrzeciona Zmiany wprowadzane przez operatora Stan przedmiotu obrabianego Temperatura Siła skrawania	Moment siły w oprawce narzędzia Siła poosiowa Drgania oprawki narzędzia Wydatek chłodziwa Prędkość obrotowa wrzeciona Zmiany wprowadzane przez operatora Stan przedmiotu obrabianego Temperatura Średnica otworu Głębokość gwintu
Optymalizacja	Okres trwałości narzędzia Wartość posuwu, prędkości skrawania (sterowanie adaptacyjne) Czas pracy Wykrywanie braków Analiza statystyczna procesu obróbki	Okres trwałości narzędzia Wartość posuwu, prędkości skrawania (sterowanie adaptacyjne) Czas pracy Wykrywanie braków Analiza statystyczna procesu obróbki	Okres trwałości narzędzia Wartość posuwu, prędkości skrawania (sterowanie adaptacyjne) Czas pracy Wykrywanie braków Analiza statystyczna procesu obróbki
Stan obrabiarki	Obciążenie napędów, drgania Drgania wrzeciona Prędkość obrotowa wrzeciona Wydatek chłodziwa i jego ciśnienie Mocowanie przedmiotu obrabianego Analiza statystyczna	Działania podejmowane wobec wszystkich typów obrabiarek. Systemy monitorujące mogą być używane wspólnie do obserwacji procesu oraz stanu maszyny. Dane pobierane z zbudowanych czujników (drgań, emisji akustycznej, momentu, siły, temperatury) oraz sterownika NC są stale analizowane, zapisywane i prezentowane na monitorze operatora. Zauważone zmiany stanu obrabiarki służą do predykcji działań serwisowych.	
Ochrona obrabiarki	Wykrywanie kolizji i minimalizowanie strat Unikanie szkodliwych drgań Kompensacja wydłużenia wrzeciona Temperatura wrzeciona	Stany alarmowe poszczególnych sygnałów są dostarczane do sterownika NC i po analizie umożliwiają reakcję zapobiegawczą. W przypadku wystąpienia kolizji natychmiastowe zatrzymanie ruchu we wszystkich osiach sterowanych pozwala na zminimalizowanie uszkodzeń, kosztów naprawy i czasu przestoju.	

TABLICA II. Czujniki i ich zastosowanie [5]

Parametr	Opis
Moment	DTA (<i>digital torque adapter</i>) – bezczujnikowa metoda pomiaru i transmisji danych z zasilacza napędu (sterowanie cyfrowe) o aktualnym momencie rozwijanym przez wrzeciono i wykorzystywane osie obrabiarki. Duża szybkość próbkowania wartości prądu oraz precyzyjna informacja o aktualnym położeniu napędzanych osi pozwalają na dokładne określenie chwilowej wartości momentu.
Moc dostarczona	W przypadku tradycyjnych obrabiarek, niewyposażonych w cyfrowe napędy i magistrale komunikacyjne, możliwe jest prowadzenie pomiaru dostarczonej mocy za pomocą czujników efektu Halla (pomiar natężenia prądu napędu wrzeciona).
Siła	Tensometry lub czujniki piezoelektryczne pozwalają na uzyskanie dużej czułości, precyzji pomiaru oraz szerokiego zakresu mierzonej siły. Są wbudowywane w korpus obrabiarki, oprawki narzędziowe, narzędzia lub umieszczane we wrzecionie.
Siła i moment	Narzędzia do gwintowania, wiertła rurowe i przeciągacze mają bardzo dużą powierzchnię bezpośredniego styku z obrabianym materiałem i zazwyczaj charakteryzują się znaczną głębokością skrawania. To się wiąże z występowaniem bardzo dużych sił tarcia i łatwością nagłego uszkodzenia lub zniszczenia narzędzia. Konieczne jest obserwowanie rozwijanego przez narzędzie momentu w celu wykrywania jego wzrostu lub gwałtownego spadku. Najlepszym miejscem do posadowania czujnika jest samo narzędzie lub jego oprawka.
Drgania	Do zmniejszenia obciążeń łożysk i wrzeciona konieczne jest minimalizowanie drgań i niewyrównoważenia narzędzia. Czujniki umieszczone są w obudowie wrzeciona i korpusie obrabiarki. Stosowane są czujniki przemieszczeń i przyspieszeń. W sytuacji kolizyjnej mierzone sygnały pozwalają na zatrzymanie ruchomych podzespołów w ciągu milisekund, ograniczając straty.
Chłodziwo	Zanieczyszczenia, metalowe opiłki, wióry, które dostają się do obiegu chłodziwa, mogą skutecznie ograniczyć jego wydatek (zmniejszenie czynnego przekroju przewodów doprowadzających) i w skrajnych przypadkach doprowadzić do znacznego wzrostu oporu skrawania, a nawet uszkodzenia (stępienia) narzędzia (zwłaszcza niewielkiego). Czujniki przepływu i ciśnienia instalowane w obwodach zasilania skutecznie monitorują ciśnienie i zapewniają utrzymanie właściwych warunków chłodzenia.
Odkształcenia	Przemieszczanie się wrzeciona – pod wpływem temperatury lub siły skrawania – powoduje zmianę położenia narzędzia (powierzchni skrawającej), co negatywnie wpływa na geometrię przedmiotu obrabianego, zwłaszcza w trakcie obróbki precyzyjnej lub wykończeniowej. Bezstykowe czujniki przemieszczenia pozwalają na wykrywanie nawet nanometrowych odkształceń. Informacje te są przesyłane do sterownika NC, gdzie wypracowywane są wartości korekcyjne położenia osi obrabiarki.
Emisja akustyczna	Czujniki są instalowane na wrzecionie lub uchwycie przedmiotu obrabianego. Pozwalają na rejestrację szerokiego zakresu częstotliwości (pasma) sygnałów; charakteryzują się wysoką czułością na uszkodzenia struktury materiału. Są wykorzystywane do wykrywania kontaktu ostrza z materiałem obrabianym, wykruszenia ostrza skrawającego, kolizji i uszkodzeń łożysk.

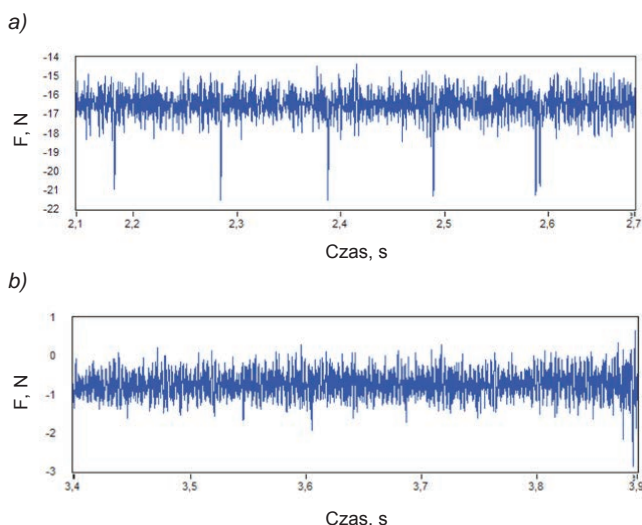
Czujniki do monitorowania

W tabl. II przedstawiono wybrane czujniki wykorzystywane do monitorowania obrabiarki, stanu narzędzia i procesu skrawania.

Akwizycja i wstępne przygotowanie sygnałów

Kluczowe zagadnienia w budowie systemów monitorowania to prawidłowe zaprojektowanie i zaimplementowanie toru pomiarowego. Nie tak ważne są liczba i cena czujników, jak dopasowanie do monitorowanego procesu, odpowiednia lokalizacja czujnika, poprawność montażu, właściwe okablowanie i zasilanie. Do częstych problemów należą szумы i zakłócenia z zasilania oraz brak uziemienia lub nieprawidłowe uziemienie. Podczas rejestracji można popełnić błędy, dobierając nieodpowiednie filtry oraz niedostateczną szybkość przetwarzania analogowo-cyfrowego [6].

Zazwyczaj czujniki używane w torach pomiarowych nie są generacyjne, a więc wymagają dedykowanych, stabilizowanych napięciowo zasilaczy. Ponieważ najtańsze są zasilacze impulsowe, pierwszy wybór może paść właśnie na nie. Zwykle efektem tego jest pojawienie się bardzo krótko trwających impulsów w mierzonym sygnale. Dobrą praktyką jest używanie osobnego zasilacza do torów pomiarowych. Często dołączenie do tego samego zasilania urządzeń cyfrowych typu *switch* kończy się zakłóceniami sygnału (rys. 1).



Rys. 1. Sygnał z siłomierza: a) z zakłóceniem i b) po usunięciu zakłócenia

Kolejnym ważnym elementem toru pomiarowego są filtry. Z reguły interesujące jest monitorowanie różnych zjawisk mechanicznych, które z natury rzadko powodują oscylacje przekraczające 1 kHz. Z jednej strony należy dobrać czujniki, które pozwolą zarejestrować całe pasmo obserwowanego zjawiska, z drugiej strony ważny jest dobór układu wstępnego przygotowania sygnału, nazywanego przedwzmacniaczem. Jego zadaniem jest zasilanie czujnika, wzmacnianie sygnału i ewentualne filtrowanie. Jak wspomniano, przetworniki czujników najczęściej nie są generacyjne, a jedynie przetwarzają wielkość fizyczną na napięcie lub prąd. Ważna jest charakterystyka takiego przedwzmacniacza, aby nie wprowadzał zmian ani w dziedzinie amplitudy, ani częstotliwości czy przesunięcia fazowego. Większość przedwzmacniaczy pracuje poprawnie.

Nie jest standardem oferowanie filtrowania sygnału przez producentów przedwzmacniaczy. Brak filtrowania sygnału może oznaczać potrzebę używania wysokich częstotliwości próbkowania w przetwornikach analogowo-cyfrowych; z drugiej strony, jeśli w torach pomiarowych użyje się filtrów o różnych charakterystykach lub chociażby częstotliwościach odcięcia, może to utrudnić przeprowadzenie prawidłowej analizy czasowej sygnałów w trybie online. Użycie wielu czujników bez filtrowania sygnałów kończy się zastosowaniem technologii Cloud czy Big Data, co sugeruje, że twórca systemu pomiarowego nie bardzo wie, jakiej informacji szuka w sygnałach pomiarowych, w związku z czym pozyskuje wiele nadmiarowych informacji i potrzebuje aplikacji chmurowej do gromadzenia i przetwarzania danych.

Producenci obrabiarek oferują doposażenie maszyn w dodatkowe czujniki [2, 3]. Nie bardzo jednak chcą się chwalić, jakie analizy matematyczne (czy inne) stosują do prowadzenia monitorowania. Twierdzą, że oferują aplikację chmurową, która te dane będzie analizować, lub że takie przetwarzanie jest w fazie rozwoju. Natomiast producenci systemów diagnostyki i monitorowania, np. Brankamp lub Montronix, opierają swe strategie na pomiarach z jednego lub dwóch czujników, na podstawie pojedynczych miar, a skuteczność osiągają w przypadku produkcji wielkoseryjnej.

Ogromny obszar produkcji jednostkowej, mało- i średnioseryjnej ciągle jest najtrudniejszy do monitorowania. Można tu wyróżnić co najmniej dwie grupy:

- monitorowanie obrabiarek (głównie: degradacji, zużycia części),
- monitorowanie procesu produkcyjnego.

Monitorowanie maszyny jest zwykle procesem wolnozmiennym; obejmuje obserwację: temperatury, mocy napędów, średniej wartości drgań łożysk, pasma drgań lub też zwykłą analizę statystyczną procesu i wykrywanie obecności kolejnych wyprodukowanych części. Monitorowanie procesów dotyczy sygnałów szybkochylnych – sił, drgań, emisji akustycznej. Konieczne jest prowadzenie analizy online, polegającej na bieżącym śledzeniu sygnału i wyszukiwaniu anomalii. Takich skomplikowanych analiz nie da się już zaprogramować w sterowniku obrabiarki. Najczęściej nie poradzi sobie z nimi komputer z typowym systemem operacyjnym. Do takich zastosowań potrzebny jest albo komputer z systemem czasu rzeczywistego, albo urządzenie z procesorem FPGA.

Kolejnym problemem jest zbudowanie komunikacji z obrabiarką. Układ monitorowania nie zadziała „na ślepo”, nie wiedząc, co robi maszyna. Pożądane są sygnały o włączeniu cyklu programu, informację, który cykl (program obróbkowy) został uruchomiony, o trwaniu ruchów roboczych i ustawczych, prędkościach i kierunkach ruchów. Dzięki temu nie trzeba gromadzić nadmiarowych danych, a analiza może się odbywać lokalnie. Dopiero wyniki monitorowania gromadzi się w chmurze i umożliwiają one monitorowanie całej linii produkcyjnej. Wiele sterowników ma co najmniej wolne wejście/wyjście cyfrowe lub analogowe, które można przypisać do uproszczonej komunikacji [2, 6]. Lepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie portów RS-232, Ethernet czy PROFIBUS do wspomnianej komunikacji.

W obrabiarkach i innych maszynach zaczynają się pojawiać nie tylko czujniki, ale tzw. agenty, które z wykorzystaniem serwerów OPC, MTConnect lub innych technologii mogą przekazywać informacje do dalszej obróbki i analizy [7].

Monitorowanie drgań

Jednym z czynników niepożądanych w obróbce skrawaniem są drgania samowzbudne, zwłaszcza w obróbce szybkościowej i wysokowydajnej. Tego typu drgania mają wpływ na pogorszenie powierzchni obrabianej, szybsze zużycie narzędzia i obrabiarki oraz podniesienie poziomu hałasu. W związku z tym nie podlega dyskusji konieczność eliminowania drgań samowzbudnych, aby proces przebiegał prawidłowo. Można to osiągnąć poprzez wyznaczenie granicy stabilności i określenie stabilnych obszarów pracy (skrawania).

Jeśli obrabiarka jest wyposażona w akcelerometr lub siłomierz, a w jej sterowniku da się ustawić pulsację prędkości obrotowej, można zaprojektować system, który online monitoruje, czy wystąpiły drgania samowzbudne. Jeśli tak, to uruchamia się procedurę pulsacji prędkości obrotowej. Prostsza alternatywą jest obserwacja, czy w trakcie skrawania występują drgania samowzbudne i wówczas dla wybranych operacji można w programie obróbkowym zaznaczyć pulsację prędkości obrotowej.

Kolejnym kierunkiem rozwoju jest monitorowanie stanu wrzeciona i drgań łożysk. Celem jest zaplanowanie serwisu obrabiarki w odpowiednim terminie, bez narażania się na produkcję przedmiotów poza granicami tolerancji, a w skrajnych przypadkach – unikanie awarii obrabiarki.

Wyznaczanie granicy stabilności

Dobłą praktyką podczas projektowania procesu technologicznego i doboru parametrów skrawania jest uwzględnienie granicy stabilności, czyli wykreślenie krzywych workowych określających zależność maksymalnej głębokości warstwy skrawanej od prędkości obrotowej wrzeciona. Wyznaczenie granicy stabilności wymaga znajomości dynamicznej charakterystyki procesu skrawania (DCPS) oraz układu masowo-sprężysto-tłumiącego (MST) obrabiarki. Spowodowane jest to tym, że drgania samowzbudne to nic innego, jak występowanie sprzężenia zwrotnego między układem MST a procesem skrawania (PS). DCPS definiuje się jako zależność siły skrawania [8, 9]:

- od chwilowych wartości grubości warstwy skrawanej zmieniającej się pod wpływem zmian względnych przemieszczeń między przedmiotem obrabianym (PO) a narzędziem (N) (w kierunku prostopadłym do krawędzi skrawania) r_t oraz fal na powierzchni obrobionej w poprzednim przejściu r_T ,
- od prędkości tych przemieszczeń r_t' :

$$F_r = F_{rk}(h) + F_{rc}(r_t'), \quad F_t = F_{tk}(h) + F_{tc}(r_t') \quad (1)$$

$$h = h_0 + h_d = h_0 - r_t + r_T \quad (2)$$

gdzie:

F_{rk}, F_{tk} – składowe siły skrawania zależne od przemieszczeń względnych między narzędziem a przedmiotem obrabianym, na kierunkach r i t ,

F_{rc}, F_{tc} – składowe siły skrawania zależne od prędkości względnych drgań układu N-PO,

h – grubość warstwy skrawanej,

h_0 – statyczna grubość warstwy skrawanej,

h_d – składowa dynamiczna h ,

$r_t = r(t)$ – wewnętrzna modulacja h ,

$r_T = r(t - T)$ – zewnętrzna modulacja h ,

T – okres przejścia ostrza.

Zatem siły F_r oraz F_t można zapisać [9–12]:

$$\begin{cases} F_r = b[k_{rd}(-r_t + r_T) - h_{er} \dot{r}_t'] \\ F_t = b[k_{td}(-r_t + r_T) - h_{et} \dot{r}_t'] \end{cases} \quad (3)$$

gdzie: b – szerokość warstwy skrawanej; k_{rd}, k_{td} – dynamiczne opory właściwe skrawania; h_{er}, h_{et} – współczynniki tłumienia procesu skrawania.

Dynamiczne opory właściwe skrawania przez linearyzację w punkcie pracy ($h = h_0$) można zapisać:

$$k_{rd} = \left. \frac{dF_r}{dh} \right|_{h=h_0} = (1 - m_r) C_r h_0^{-m_r} \quad (4)$$

gdzie: C_r, m_r – stałe wyznaczone doświadczalnie. Wzór (4) będzie analogiczny dla kierunku t , z odpowiednio wyznaczonymi stałymi C_t, m_t .

Układ masowo-sprężysto-tłumiący obrabiarki jest tworzony przez układ OUPN. Ponieważ układ ten jest złożony, o wielu stopniach swobody, w związku z tym najprościej jest jego charakterystykę wyznaczyć doświadczalnie, przeprowadzając analizę modalną. Analiza modalna pozwala na określenie parametrów modalnych – tj. częstotliwości drgań własnych, tłumienia, sztywności oraz masy modalnej – dla każdej postaci drgań. Do empirycznego wyznaczenia parametrów modalnych wykorzystuje się energię uderzenia młotka modalnego [10, 11].

W rozważaniu przykładu toczenia ortogonalnego i wpływu PS na układ MST o dwóch stopniach swobody sygnałami wejściowymi do układu MST są siły skrawania promieniowa (F_r) i styczna (F_t), w zapisie macierzowym [9]:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_r \\ F_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

Siły F_{x1} i F_{x2} , działające wzdłuż głównych osi sztywności x_1 i x_2 , wyznacza się przez rzutowanie sił skrawania F_r i F_t :

$$\mathbf{F}_x = \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{x2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_r \\ F_t \end{bmatrix} = \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_r \\ F_t \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{F}$$

gdzie:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Natomiast sygnałami wyjściowymi są przemieszczenia wzdłuż kierunku prostopadłego do prędkości skrawania r , decydujące o siłach skrawania. Otrzymać je można, rzutując przemieszczenia wzdłuż osi x_1 i x_2 na kierunek r :

$$r = \mathbf{B} \mathbf{X} \quad (8)$$

gdzie:

$$\mathbf{B} = [\cos \alpha \quad \sin \alpha] = [a_{11} \quad a_{21}], \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Wówczas funkcję przejścia układu MST we współrzędnych x_1, x_2 można przedstawić:

$$\mathbf{W}_x = \frac{\mathbf{X}}{\mathbf{F}_x} = \begin{bmatrix} w_{11} & 0 \\ 0 & w_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

gdzie:

$$w_{11} = \frac{\sum_{j=1}^{N_1} x_{1j}}{F_{x1}} = \sum_{j=1}^{N_1} \frac{1}{s^2 m_{1j} + s c_{1j} + k_{1j}}; \quad (11)$$

$$w_{22} = \frac{\sum_{j=1}^{N_2} x_{2j}}{F_{x2}} = \sum_{j=1}^{N_2} \frac{1}{s^2 m_{2j} + s c_{2j} + k_{2j}}$$

$m_{1j}, c_{1j}, k_{1j}, m_{2j}, c_{2j}, k_{2j}$ – modalne masy, współczynniki tłumienia i sztywności dla poszczególnych (j -tych) postaci (mód) drgań w kierunkach x_1 i x_2 ; N_1, N_2 – liczby postaci drgań w kierunkach x_1 i x_2 .

Do analizy stabilności określa się funkcję przejścia układu MST we współrzędnych procesu skrawania r i t :

$$\mathbf{W}_{\text{MST}} = \mathbf{B}\mathbf{W}_x\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} \\ 0 & w_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{11} & 0 \\ 0 & w_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

czyli:

$$\mathbf{W}_{\text{MST}} = [w_r \quad w_t] = \begin{bmatrix} a_{11}^2 w_{11} + a_{21}^2 w_{22} & a_{11} a_{12} w_{11} + a_{21} a_{22} w_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

W oparciu o równania (3,4) funkcja przejścia procesu skrawania może być zapisana w postaci:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_r \\ F_t \end{bmatrix} = -b \begin{bmatrix} k_{rd}(1 - e^{-sT}) + sh_{er} \\ k_{td}(1 - e^{-sT}) + sh_{et} \end{bmatrix} r = -b\mathbf{k}r \quad (14)$$

gdzie:

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_{rd}(1 - e^{-sT}) + sh_{er} \\ k_{td}(1 - e^{-sT}) + sh_{et} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{rr} \\ k_{tr} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Funkcja przejścia układu otwartego ma postać:

$$\mathbf{W}_o = \mathbf{W}_{\text{MST}}\mathbf{F} = -b\mathbf{W}_{\text{MST}}\mathbf{k} = -b[w_r \quad w_t] \begin{bmatrix} k_{rr} \\ k_{tr} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{W}_o = -b(w_r k_{rr} + w_t k_{tr}) \quad (17)$$

a transmitancję układu zamkniętego zapisuje się:

$$\mathbf{W}_z = \frac{\mathbf{W}_o}{1 - \mathbf{W}_o} \quad (18)$$

gdzie \mathbf{I} – jednostkowa macierz diagonalna.

Zgodnie z [12] poszukuje się pierwiastków równania charakterystycznego, na podstawie którego można metodami analitycznymi bądź numerycznymi wyznaczyć krzywe workowe określające granicę stabilności:

$$\mathbf{I} - \mathbf{W}_o = \mathbf{I} + b_{\text{lim}} \mathbf{W}_{\text{MST}}\mathbf{k} = 1 + b_{\text{lim}}(w_r k_{rr} + w_t k_{tr}) = 0 \quad (19)$$

Następnie, na podstawie krzywej workowej, dla wybranej prędkości obrotowej można dobrać największą możliwą głębokość skrawania, przy której zostanie utrzymana stabilność procesu.

Przykłady komercyjne

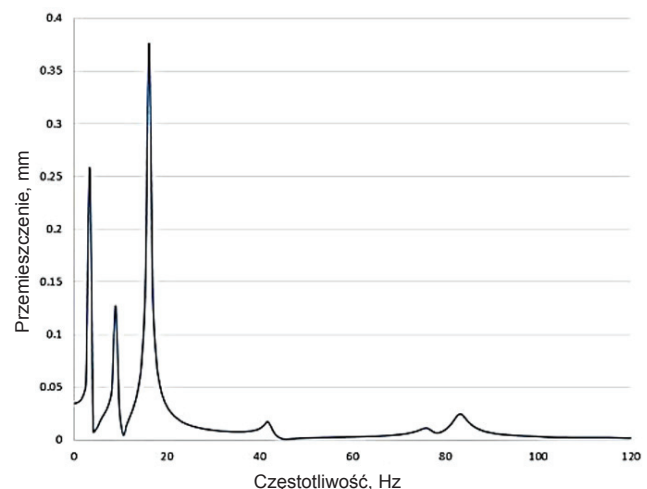
■ **Sandvik, PROMETEC.** Metod unikania drgań jest wiele. Jeśli nie ma możliwości wyznaczenia granicy stabilności, najprostszym sposobem jest zmniejszenie wysięgu narzędzia, oczywiście o ile to możliwe. Gdy potrzebne są większe wysięgi narzędzi, np. dla wytaczaków, producenci oferują oprawki z wbudowanymi pasywnymi i aktywnymi tłumikami drgań. Pomimo większych kosztów takiej



Rys. 2. Monitorowanie procesu skrawania proponowane przez firmy Sandvik i PROMETEC [13]

oprawki, zapewnienie lepszej jakości powierzchni obrabianej jest dobrym uzasadnieniem wydatku. Przykładem może tu być efekt współpracy firm Sandvik i PROMETEC, które proponują narzędzia z wbudowanymi tłumikami drgań, czujnikami mierzącymi drgania czy siły skrawania (rys. 2).

■ **Reiden Technik AG.** Skuteczną metodą unikania niekorzystnych drgań podczas obróbki może być także wykorzystanie specjalnych materiałów konstrukcyjnych w obrabiarkach (na korpusy). Przykładem jest HYDRO-POL – unikalny kompozyt z betonu i stali (stalowej obudowy wypełnionej specjalnym betonem). Jego własności pozwalają na skuteczną absorpcję drgań. Charakteryzuje się także dużą sztywnością dynamiczną oraz brakiem konieczności wygrzewania obrabiarki przed pracą, ponieważ współczynnik rozszerzalności cieplnej jest stały i ma niewielką wartość. Stosowanie go przynosi oszczędności ok. 30% materiału w porównaniu z tradycyjnymi odlewami żeliwnymi, a obciążenia narzędzia są zredukowane o 15÷20%. Gęstość nowego materiału to 2500 kg/m³, moduł sprężystości – 60 000 N/mm², maksymalny nacisk powierzchniowy – do 100 N/mm². Na rys. 3 przedstawiono wykres podatności materiału w funkcji częstotliwości.



Rys. 3. Wartość przemieszczenia w funkcji częstotliwości dla kompozytu HYDROPOL [14]

■ **Bimatec Soralue.** Firma proponuje nowy, aktywny, dynamiczny stabilizator DAS+ (Dynamic Active Stabilizer). Jego działanie poprawia jakość obrabianej powierzchni i zmniejsza ryzyko złamania narzędzi przez wydłużenie ich żywotności w ekstremalnych warunkach skrawania. Zasada działania polega na ciągłym pomiarze drgań i wytwarzaniu – przez system siłowników – przeciwnym zwrocie, co doprowadza do wygaszenia oscylacji. W ten sposób zwiększona jest dynamiczna sztywność obrabiarki. Obserwowane jest znaczne

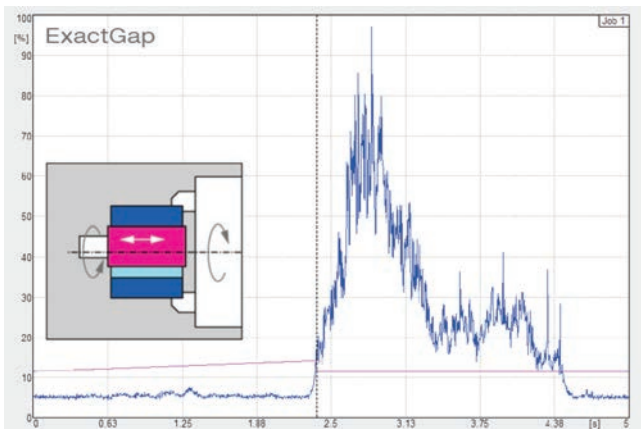


Rys. 4. Zakres działania układu DAS+ [15]

podniesienie wydajności obróbki (nawet o 300%). Na rys. 4 zaprezentowano zakres częstotliwości, w jakim możliwa jest reakcja aktywnego systemu DAS+.

■ System ExactControl firmy Schmitt Industries.

Urządzenie w formie samodzielnego kontrolera, do wyznaczania i monitorowania niezbalansowania elementów obrotowych, umożliwia dołączenie sześciu niezależnych czujników emisji akustycznej. Pozwala na pomiar automatyczny lub ręczny tradycyjnych systemów łożyskowych, łożysk hydrostatycznych oraz sygnałów akustycznych. Dodatkowo system jest wyposażony w interfejsy sieciowe Profibus oraz Ethernet, wejścia/wyjścia analogowe i cyfrowe. Standardowe zastosowania obejmują monitorowanie: energii, obciążenia wrzeciona, drgań, temperatury, momentu i prędkości obrotowej, jak również wymianę danych ze sterownikami maszyn NC – wyniki działania systemu są widoczne na ekranie monitora. Wszystkie strategie są samouczące się, co pozwala na precyzyjną adaptację do praktycznie wszystkich procesów. Każdy cykl monitorowania jest rozpatrywany i analizowany indywidualnie, a wyliczane parametry stanowią podstawę do dalszych działań.



Rys. 5. Monitorowanie w systemie ExactControl [16]

Stałe rozpoznawanie tła rejestrowanych sygnałów (rys. 5) ułatwia wykrywanie „skrawania powietrza” i jego eliminację. Dzięki ciągłej analizie charakteru sygnału można także uniknąć negatywnego wpływu różnego rodzaju zakłóceń, wywoływanych np. przez: chłodzenie, silniki, napędy osi sterowanych czy bliskie obrabiarki. Jako ilustracja może posłużyć sytuacja znacznego wzrostu głośności pracujących łożysk spowodowanego technologicznym zwiększeniem prędkości obrotowej wrzeciona. Następuje wówczas adaptacyjne określenie nowego poziomu tła sygnału bez wygenerowania alarmu przekroczenia wartości dopuszczalnej.

Możliwe jest także rejestrowanie wzorców sygnałów (np. dla charakterystycznego fragmentu obróbki, stanu maszyny lub narzędzia) i bieżące porównywanie aktualnej wartości z wybranym wzorcem. W przypadku braku zgodności zostanie wygenerowany odpowiedni alarm lub zatrzymana obróbka.

Operator – znający proces – może samodzielnie ustalać zakresy dopuszczalnych wartości sygnałów, będących miarą konkretnej cechy procesu. Zakresy te nie muszą być sztywne, gdyż mogą podlegać dynamicznym zmianom w zależności od fluktuacji obserwowanego sygnału związanego z realizowaniem określonej części procesu technologicznego.

Możliwe jest także pośrednie obserwowanie wydajności i produktywności obrabiarki. Na podstawie porównania zakumulowanego czasu kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym z innymi zarejestrowanymi czasami wykonywania danej operacji określony zostaje rzeczywisty czas obróbki. W przypadku różnic wobec wzorca tworzony jest komunikat podający przyczyny rozbieżności wraz z wartościami czasu i okresami ich wystąpienia.

Przy monitorowaniu niezbalansowania możliwe jest jego wykrywanie o wartości nawet 0,02 μm dla stałej prędkości badawczej 600 obr/min. Zakres prędkości obrotowych zawiera się od 30 do 30000 obr/min. Zakres rejestrowanych przyspieszeń drgań to $50 \mu\text{g} \div 1,25 \text{g}$ ($\text{g} = 9,80 \text{ m/s}^2$). Rozdzielczość pomiaru drgań wynosi 0,001 μm . Dopuszczalne jest ustalanie przez użytkownika indywidualnych strategii filtrowania pozyskiwanych sygnałów w celu ich dokładniejszej analizy i unikania fałszywych alarmów.

■ **Montronix.** Firma Montronix oferuje gamę czujników oraz oprogramowania do analizy sygnałów. Jedną z propozycji jest akcelerometr trójosiowy z wbudowanym przetwornikiem analogowo-cyfrowym i nadajnikiem Wi-Fi (rys. 6). Jest to jedna z niewielu komercyjnych propozycji czujników bezprzewodowych. Bezprzewodowość jest wielkim atutem systemu, gdyż – jeśli obrabiarka nie ma wbudowanych czujników – zachęcenie firmy produkującej do dodatkowego serwisu obrabiarki celem dołożenia czujników jest niemal niemożliwe. Problemem jest także konstrukcja obrabiarek i jej wieloosiowość, konieczność stosowania przewodów pomiarowych powoduje, że czujnik można zainstalować w dość dużej odległości od strefy skrawania, na pierwszym nieporuszającym się elemencie, co często jest przyczyną tłumienia istotnych informacji z procesu skrawania.



Rys. 6. System bezprzewodowego pomiaru przyspieszeń firmy Montronix [17]

Do gamy czujników można dokupić oprogramowanie PulseNG-hmi do monitorowania sygnałów. Oferuje ono proste miary typu wartości średnie, przekroczenia progów czy analizę FFT w czasie rzeczywistym.

■ **Brankamp.** Kolejną ciekawą propozycją jest detekcja kolizji. U uruchamianie nowego procesu technologicznego wiąże się z ryzykiem złego uwzględnienia wysunięcia narzędzia czy niedopatrzania związanego z geometrią uchwytów obróbkowych. Według specjalistów z Brankamp typowy czas reakcji pracownika na nieprzewidzianą kolizję może wynosić od 1 do 10 s, kolejne opóźnienie układu sterowania – od 20 do 200 ms oraz fizyczne zatrzymanie napędu – od 100 do 500 ms. System CMS ma zastąpić i skrócić reakcję operatora do 1 ms. System ECO700 (rys. 7) dodatkowo wyświetla przebiegi wybranych sygnałów, z czujników oraz mierzy maksymalną wartość siły, przekroczenie granic i kilka innych prostych miar sygnałów, m.in. w zastosowaniu do obróbki skrawaniem.



Rys. 7. System monitorowania procesu skrawania firmy Brankamp [18]

Podsumowanie

Jak wynika z przedstawionych przykładów urządzeń komercyjnych oraz rozważań teoretycznych, zagadnienia monitorowania drgań oraz przeciwdziałania ich negatywnemu wpływowi na wynikową jakość obróbki nie są proste. Kluczowe są umiejętność pozyskania użytecznych informacji o stanie procesu i obrabiarki oraz komunikacja sterownika z systemem monitorowania. Jednak, jak się wydaje, pomimo złożoności tego procesu jest to obecnie absolutna konieczność w przypadku rzeczywistego wprowadzania koncepcji Industry 4.0.

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – nr umowy InnoLot/I/10/NCBR/2014 – INNOGEAR.

LITERATURA

1. Szulewski P. „Koncepcje i elementy inteligentnej fabryki przyszłości”. *Mechanik*. 90, 2 (2017): s. 98–102.
2. Śniegulska-Grądzka D., Szulewski P. „Systemy automatycznego monitorowania drgań w obrabiarkach”. *Mechanik*. 90, 3 (2017): s. 170–175.
3. Szulewski P. „Nowoczesne funkcje diagnostyczne we współczesnych sterownikach NC”. *Mechanik*. 89, 1 (2016): s. 5–12.
4. www.marposs.com/application.php/eng/milling_machine_monitoring (dostęp: 22.11.2017).
5. www.artis.de/en/company/the-tool-monitoring-company (dostęp: 4.12.2017).
6. Nejman M., Śniegulska-Grądzka D., Jemielniak K. „Wpływ charakterystyki toru pomiarowego na bezpośredni pomiar siły skrawania w czasie występowania drgań”. *Mechanik*. 87, 8–9 (2014): s. 400–407.
7. Szulewski P. „W kierunku samoorganizujących się środowisk wytwórczych”. *Mechanik*. 90, 7 (2017): s. 494–500.
8. Eynian M., Altintas Y. „Chatter stability of general turning operations with process damping”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 131 (2009): s. 041005.1–041005.10.
9. Jemielniak K., Nejman M., Śniegulska-Grądzka D. „Wyznaczenie dynamicznych współczynników siły skrawania poprzez bezpośredni pomiar siły skrawania w czasie występowania drgań”. *Mechanik*. 87, 8–9 (2014): s. 31–38.
10. Bąk P.A., Jemielniak K. „Zastosowanie automatycznej analizy modalnej w diagnostyce wrzecion frezarek”. *Mechanik*. 88, 3 (2015): s. 101–108.
11. Altintas Y. „Machining process Modeling, Machine Tap testing and Chatter Vibration Avoidance”. *Manufacturing Automation Laboratory*. Vancouver (Canada): University of British Columbia, 2002.
12. Downey J., Bombirski S., Nejman M., Jemielniak K. „Automatic multiple sensor data acquisition system in a real-time production”. *Procedia CIRP*. 33, 6 (2015): s. 215–220.
13. www.equip-prod.com/outil_couplant/proposer-une-solution-complete-pour-couvrir-tous-les-besoins-de-lindustrie-4-0 (dostęp: 14.12.2017).
14. www.reiden.com (dostęp: 2.01.2018).
15. www.soraluce.com (dostęp: 4.01.2018).
16. www.grindingcontrol.com/wp-content/uploads/ExactControlen.pdf (dostęp: 10.01.2018).
17. www.montronix.com/en/products/functionality/interface/wlan-boxng-en.html (dostęp: 12.01.2018).
18. www.brankamp.com/en/data/files/products/prospekt_cf_eco700_en.pdf (dostęp: 5.01.2018). ■