

Systemy automatycznego monitorowania drgań w obrabiarkach

Systems of automatic vibration monitoring in machine tools

PIOTR SZULEWSKI

DOMINIKA ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.3.37>

Omówiono przykładowe układy nadzorowania stanu procesu w obróbce skrawaniem, wykorzystujące drgania samowzbudne pojawiające się podczas pracy obrabiarki. W zaprezentowanych układach stosowane są techniki monitorowania oparte na zaawansowanej analizie sygnałów pochodzących z czujników siły, przyspieszenia lub emisji akustycznej. Współpraca układów nadzoru ze sterownikami CNC pozwala na skuteczne eliminowanie wykrytych drgań poprzez zmianę parametrów obróbki.

SŁOWA KLUCZOWE: drgania samowzbudne, monitorowanie i nadzorowanie obrabiarek CNC, EMO 2015

The paper illuminates and discusses some examples of process status monitoring systems in machining. The special techniques based on advanced signals analysis from force sensors, accelerometers, or acoustic emissions are used to detect of chatter vibrations. Monitoring systems could also co-operate with CNC controllers for effective vibration elimination by changing process parameters.

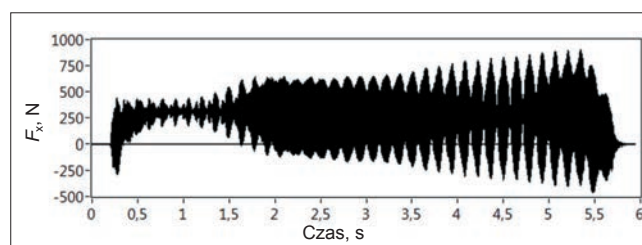
KEYWORDS: vibrations, CNC machine-tools monitoring and supervision, EMO 2015

Obserwując wykorzystanie w przemyśle maszyn technologicznych i obrabiarek skrawających ze sterowaniem numerycznym, można zauważyć, że ich popularność znacząco rośnie na przestrzeni ostatnich lat. Coraz powszechniejsze stosowanie komputerowych układów sterowania (CNC) jest odpowiedzią na wymagania rynku. Klienci kładą nacisk przede wszystkim na wysoką jakość wyrobu, precyzję wykonania, niski koszt wytworzenia, a także szybkość produkcji i różnorodność oferty [1]. Dokładność pracy, wydajność, minimalne oddziaływanie na otoczenie i niezawodność to cechy opisujące jakość współczesnej obrabiarki. W dużej mierze są one zależne od podatności dynamicznej układu masowo-sprężysto-tłumiącego, jakim jest w istocie obrabiarka. W większości przypadków na nowoczesnych centrach obróbkowych realizuje się kilka różnych operacji, co pozwala na skrócenie czasu pracy, a co za tym idzie – na obniżenie kosztów wytwarzania. Mnogość oraz różnorodność operacji technologicznych wraz z dokładną obróbką wykończeniową (z małymi nadatkami) i złożona geometria wykonywanych przedmiotów determinują często stosowanie smukłych narzędzi, a to z kolei może się przyczyniać do występowania drgań w kontakcie narzędzia z przedmiotem obrabianym.

Drgania

Obrabiarka jako złożony układ masowo-sprężysto-tłumiący (MST) pod wpływem obciążeń dynamicznych pobudzana jest do drgań, m.in. swobodnych, wymuszonych oraz samowzbudnych. Drgania swobodne pojawiają się

w momencie wytrącenia układu z równowagi przez nagłe pojawienie się procesu przejściowego (zakłócenia), tj. rozruchu bądź hamowania. Drgania wymuszone wzbudzone są przez zewnętrzną zmienną siłę wymuszającą, np. w przypadku cyklicznie zmiennej siły skrawania bądź niewyważenia części obrotowych maszyn. Trzeci typ drgań – drgania samowzbudne – są związane z wystąpieniem sprzężenia zwrotnego między układem MST a oddziałującą na niego siłą i nie ustają pomimo zaniku wymuszenia [2]. Drgania samowzbudne typu *chatter* (rys. 1) wpływają szczególnie negatywnie na przebieg procesu, stan przedmiotu obrabianego (falistość, chropowatość), żywotność obrabiarki i kondycję narzędzia, a także na efektywność obróbki. Dodatkowo przyspieszają zużycie łożyskowania wrzeciona i zużycie krawędzi skrawającej narzędzia (jest nie tylko szybsze, ale nawet katastroficzne). Utrudniają otrzymanie wymaganej jakości powierzchni oraz wywołują nadmierny hałas, co niekorzystnie wpływa na podstawową cechę charakteryzującą każdą obrabiarkę – dokładność – rozumianą jako precyzja odtworzenia pożądanego kształtu i wymiaru przedmiotu obrabianego [3,4]. Występowanie takich okresowych drgań jest ściśle powiązane z procesem skrawania. Aby uniknąć ich negatywnego oddziaływania, konieczne jest stosowanie bardzo rozbudowanych układów diagnostyki stanu procesu i obrabiarki.



Rys. 1. Przykład drgań samowzbudnych noża tokarskiego; F_x – składowa siły podczas toczenia na kierunku X

Układy pomiarowe

Układy pomiarowe mogą stanowić integralną część sterownika CNC maszyny technologicznej, występować jako opcjonalny element programowy lub całkowicie zewnętrzny, sprzętowy moduł pomiarowy. Od strony technicznej systemy te najczęściej bazują na analizie sygnałów zarejestrowanych przez czujniki, zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości.

Do budowy układów pomiarowych wykrywających drgania wykorzystuje się rozmaite czujniki, wśród których należy wymienić dynamometry obrotowe montowane we wrzecionach frezarek, akcelerometry, czujniki sił (w tym również płytowe) i emisji akustycznej, mikrofony, interferometry laserowe oraz czujniki indukcyjne. W pracach naukowo-badawczych można znaleźć przykładowe zastosowania różnych czujników wykrywających drgania obrabiarek bądź diagnozujących (online) drgania samowzbudne [5, 6].

* Dr inż. Piotr Szulewski (maxer@cim.pw.edu.pl), dr inż. Dominika Śniegulska-Grądzka (d.gradzka@yahoo.pl) – Instytut Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej

Inny, prostszy, a przede wszystkim tani sposób wykrywania drgań samowzbudnych online opisany jest w literaturze [7], a polega na zastosowaniu zwykłego mikrofonu podłączonego do karty dźwiękowej komputera klasy PC i analizie zmiany sygnału w oknach czasowych. Należy zwrócić uwagę, że wytwórcy współczesnych obrabiarek coraz częściej standardowo wyposażają je w różnego rodzaju czujniki, a sygnały z nich pochodzące mogą być udostępniane także zewnętrznym układom pomiarowym [8].

Eliminowanie drgań

Jedną z najczęściej wykorzystywanych metod unikania drgań samowzbudnych jest praca w obszarze stabilnym, wyznaczanym na podstawie obliczonej granicy stabilności, pozwalającej na określenie parametrów obróbki, dla których nie występują drgania samowzbudne [9]. W tym celu można sięgnąć po następujące metody przeciwdziałające rozwojowi drgań samowzbudnych [10–12]:

- dobór grubości warstwy skrawanej,
- zmianę prędkości obrotowej,
- pulsację prędkości obrotowej,
- dobór geometrii narzędzia,
- w obróbce frezowaniem – stosowanie frezów o zmiennej podziałce,
- zastosowanie tłumików biernych i aktywnych.

Ze względu na zmieniające się warunki obróbki i nieliniowy model procesu skrawania korzystniejszym sposobem zapewnienia stabilności pracy obrabiarki wydaje się kontrola przez regulację prędkości obrotowej wrzeciona. Może ona być realizowana:

- offline (gdzie kolejność działań jest następująca: wykrycie drgań, zatrzymanie posuwu, zmiana prędkości obrotowej i wznowienie procesu skrawania),
- online (korekcja prędkości obrotowej na bieżąco, bez zatrzymania posuwu; cały czas monitorowane jest pojawianie się drgań, w momencie ich wystąpienia do układu sterowania wysyłane jest polecenie zmiany prędkości obrotowej) [13].

W dostępnych na rynku systemach monitorowania/nadzoru zauważalne jest dążenie, aby jednocześnie zapewnić stabilną obróbkę oraz zoptymalizować proces skrawania. Wynika stąd konieczność realizacji dwóch podstawowych działań [14]:

- wykrywania drgań i diagnostyki,
- eliminacji drgań lub optymalizacji procesu.

W drugim przypadku konieczne jest zapewnienie skutecznej komunikacji pomiędzy układem pomiarowym a sterownikiem obrabiarki. Informacje z układu monitorującego są przesyłane do kontrolera NC, który podejmuje działania mające na celu zminimalizowanie lub usunięcie niekorzystnych zjawisk [15].

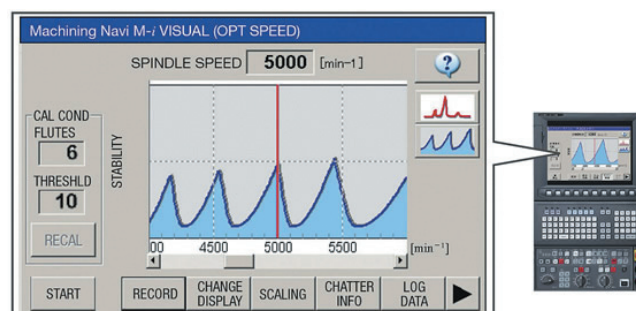
Układy nadzoru

Dostępne na rynku rozwiązania to propozycje zarówno producentów sterowników CNC, wytwórców obrabiarek, jak i niezależnych dostawców. Przedstawiono gotowe systemy i koncepcje badawcze z naciskiem na określenie obecnego kierunku prac w zakresie monitorowania procesu skrawania.

Machining Navi – firmy Okuma

Jest to zestaw funkcji (programowych i sprzętowych) optymalizujących warunki skrawania na obrabiarce NC podczas obróbki (rys. 2). Składa się z dwóch niezależnych

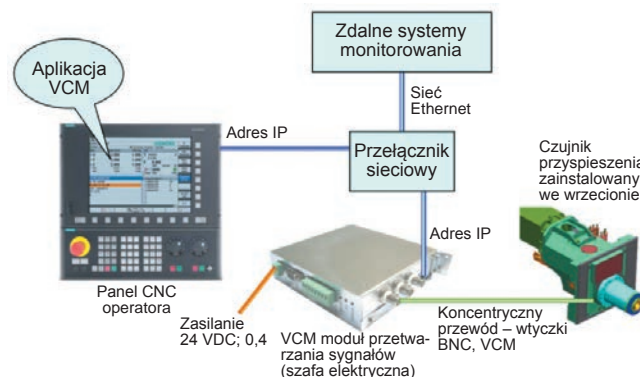
modułów. Moduł M-g (*guidance*) prowadzi ciągłą analizę rejestrowanych drgań. W przypadku wystąpienia niekorzystnej sytuacji – pojawienia się drgań samowzbudnych – informuje o tym operatora i proponuje konkretne zmiany wartości prędkości obrotowej wrzeciona. Moduł M-i (*intelligence*) działa samodzielnie, bez konieczności nadzoru ze strony operatora. W pomiarze wykorzystuje emisję akustyczną. Czujnik w postaci mikrofonu jest instalowany na obudowie obrabiarki (!) i sygnał pomiarowy jest wprowadzony bezpośrednio do sterownika CNC za pomocą interfejsu USB w panelu operatora. Badany jest zakres częstotliwości od 0 do 10 kHz. Analiza pozyskanego sygnału odbywa się na bieżąco, monitorowane są jego amplituda i częstotliwość. Wykrywane są gwałtowne wzrosty mocy dźwięku (prążki) oraz ich liczba w zakresie monitorowanego pasma. Operator podaje liczbę krawędzi skrawających stosowanego narzędzia, nie są natomiast istotne: rodzaj obróbki, typ narzędzia czy geometria krawędzi skrawającej. Wyniki pomiarów są prezentowane na wyświetlaczu monitora sterownika (HMI) w formie wykresu. Według producenta wynikowe zmiany prędkości obrotowej wrzeciona nie są duże – krok dostrojenia mieści się w granicach $0,5 \pm 2\%$ nominalnej prędkości obrotowej. Najlepsze efekty są obserwowane dla obróbki wykończeniowej.



Rys. 2. Przykład pomiarów drgań wrzeciona realizowanych przez moduł Machining Navi firmy Okuma (www.okuma.com)

System VCM (Vibration Control Monitor) – firmy Omative

System opiera się na pomiarze drgań przenoszonych przez elementy konstrukcyjne obrabiarki. Tor pomiarowy składa się z czujników, zespołu akwizycji i panelu operatora służącego do konfigurowania systemu oraz prezentacji wyników obliczeń (rys. 3). Jako panel informacyjny wykorzystywany jest zabudowany w obrabiarce wyświetlacz HMI. Źródłem sygnału pomiarowego są czujniki (ICP) wyposażone w scalony układ piezoelektryczny ze wzmacniaczem ładunku oraz źródłem prądowym (*integral electronic piezoelectric*), pracujące jako akcelerometry.



Rys. 3. Struktura układu nadzoru VCM firmy Omative (www.omative.com)

Maksymalnie można obserwować trzy kanały pomiarowe jednocześnie. Każde z wejść wyposażone jest w antyaliasingowy filtr dolnoprzepustowy (<10 kHz) o bardzo stromej charakterystyce (min. 80 dB). Częstotliwość próbkowania jest stała i wynosi 20480 próbek na sekundę. Aby zwiększyć czułość pomiaru, wejścia mają indywidualne przedwzmacniacze o regulowanym współczynniku wzmacnienia ($1 \div 16$).

Sterownik jest wyposażony w cztery programowalne wyjścia cyfrowe będące przekaźnikami elektronicznymi (*solid state*), służące do połączenia z wejściami PLC w sterowniku obrabiarki. Czas reakcji w przypadku wykrycia kolizji jest krótszy niż 1 ms.

Bazowe oprogramowanie składa się z trzech modułów. Podstawowy moduł to program do obsługi zespołu akwizycji (*firmware*) odpowiedzialny za przetwarzanie danych i przechowywany w pamięci typu Flash, umieszczonej wewnątrz sterownika. W środowisku HMI sterownika NC jest uruchamiane dedykowane oprogramowanie stanowiące interfejs operatora (rys. 4). W środowisku sterownika PLC instalowane jest oprogramowanie interfejsowe, zarządzające wymianą sygnałów sterujących pomiędzy systemem akwizycji a PLC. Oprogramowanie jest kompatybilne z wybranym układem sterowania CNC obrabiarki. W wyniku analizy wyświetlane są komunikaty diagnostyczne, ostrzeżenia lub – w przypadkach granicznych – zatrzymywana jest obróbka. Możliwe jest rejestrowanie mierzonych sygnałów w celu stworzenia „obrazu stanu obrabiarki” – zgodnie z normą DIN ISO 10816-3 – Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących.

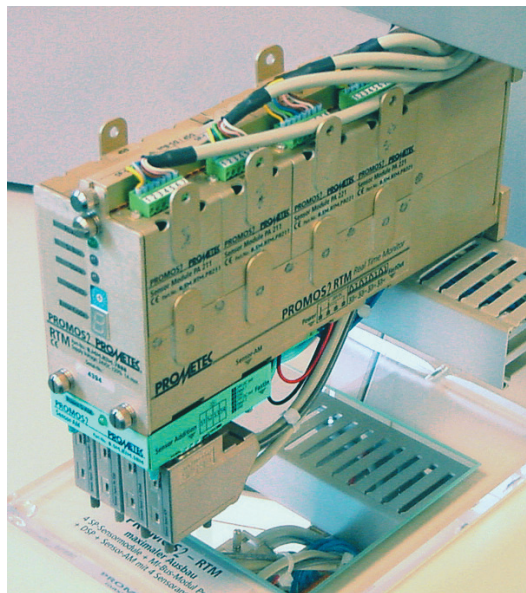


Rys. 4. Wygląd ekranu sterownika NC z wynikami pomiarów VCM widma drgań wrzeciona (www.omative.com)

Promos 2 – firmy Prometec

System umożliwia wykrywanie kolizji, zbyt dużych obciążeń związanych ze zmianą warunków skrawania, katastroficznego stępienia ostrza, złamania narzędzia, początku (kontakt narzędzia) i końca obróbki, a także monitorowanie procesu skrawania (również podczas obróbki zgrubnej), wykrywanie i wizualizację sił skrawania, monitorowanie wrzeciona (zużycia, istnienia niezbilansowanych mas), łożysk tocznych, prowadnic i innych podzespołów obrabiarki. Stosowane są piezoelektryczne czujniki siły, czujniki elektrycznej mocy dostarczonej do obrabiarki (natężenia, napięcia, współczynnika mocy – $\cos \varphi$), czujniki emisji akustycznej (mocowane na korpusie maszyny oraz mierzące poprzez chłodziwo), czujniki

drgań i pomiaru odległości. Moduł centralny, wyposażony w procesor sygnałowy DSP (rys. 5), przetwarza sygnały pomiarowe w czasie rzeczywistym, kontroluje ustalone limity statyczne oraz zmienne limity dynamiczne, analizuje trendy oraz przeprowadza dyskretne przekształcenie falkowe (*wavelet*). Możliwe jest przetwarzanie maksymalnie czterech niezależnych sygnałów jednocześnie. W stanie awaryjnym wysyłany jest sygnał zatrzymania wszystkich napędów obrabiarki. Czas reakcji w cyklu IPO (Input Processing Output) wynosi od 10 do 15 ms. Producent deklaruje, że czułość układu jest tak duża, że jest on w stanie prowadzić nadzór nad procesem wiercenia otworu o średnicy min. 0,05 mm w aluminium. Możliwe jest także rozszerzenie funkcjonalności o opcję sterowania adaptacyjnego (ACfeed), pozwalającą na aktywne ingerowanie w ustalone parametry posuwu w celu maksymalizacji wydajności obróbki przy minimalizacji czasu cyklu i zachowaniu lub wydłużeniu długości życia narzędzia. System może współpracować ze sterownikami NC firm Siemens, Indramat (Bosch Rexroth) oraz Fanuc.



Rys. 5. Sterownik i układ akwizycji Promos 2 firmy Prometec (www.prometec.com)

Toolinspect II – firmy MCU

Jest to automatyczny system monitorowania z opcją samouczenia się i inteligentnymi strategiami kontroli narzędzia (rys. 6). Charakteryzuje się nieograniczoną liczbą monitorowanych narzędzi, wykrywaniem uszkodzenia narzędzia lub katastroficznego stępienia ostrza, możliwością monitorowania zużycia narzędzia, wspieraniem strategii sterowania adaptacyjnego w funkcji posuwu, opcjonalnym interfejsem MDA (Machine Data Acquisition) oraz zapisywaniem danych na bezpiecznych nośnikach zewnętrznych (np. kartach pamięci CF). Wyposażony jest w cztery niezależne kanały pomiarowe pozwalające na współbieżne analizowanie trzech wartości momentu lub sił na każdym kanale oraz dające możliwość obserwowania i analizowania toru ruchu (położenia). Osiągana szybkość pętli skanowania mierzonych zmiennych nie przekracza 5 ms (200 Hz). W opcji jest także monitorowanie sygnałów analogowych w popularnych standardach przemysłowych (0÷10 V, 0÷20 mA, sygnały cyfrowe 24VDC). Pomiar siły na elementach mocujących narzędzia jest realizowany za pomocą czujnika piezoelektrycznego.

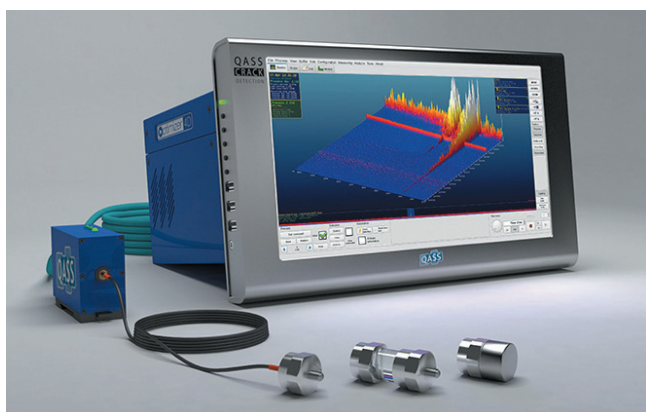


Rys. 6. System monitorowania drgań Toolinspect II firmy MCU (www.mcu-gmbh.de)

Toolinspect II polecany jest szczególnie do obrabiarek z głowicami rewolwerowymi, systemów załadunku palet oraz robotów. Moc elektryczna dostarczona do napędów osi i wrzeciona jest kontrolowana poprzez zastosowanie aktywnych, indukcyjnych zespołów pomiarowych wyposażonych w układy filtrujące i wzmacniające. Drgania przenoszone przez elementy konstrukcyjne obrabiarki są mierzone przez czujniki drgań. Moduł analizujący komunikuje się ze sterownikiem NC za pomocą sieci przemysłowej Profibus DP (do 12 Mbit/s) lub FanucBus. Bezpośrednio ze sterownika NC pobierane są dane o aktualnej wartości rozwijanego na wrzecionie momentu, pozycji napędów, wartości wykonywanych w osiach posuwów i momentów oraz deklarowanej funkcji G. Do systemu mogą być wprowadzane także sygnały cyfrowe, pochodzące np. z PLC obrabiarki. Maksymalna liczba sygnałów cyfrowych wynosi 32. Do szybkiej reakcji mogą być wykorzystane 32 wyjścia cyfrowe. Informacje przeznaczone dla operatora są bezpośrednio przesyłane na panel sterownika z wykorzystaniem magistrali szeregowej w standardzie RS 232C i sieci TCP/IP. Obecnie system monitorowania może współpracować ze sterownikami firm Fanuc, Heidenhain, Bosch, Indramat i Siemens.

Qass IM Optimizer 4D – firmy Toses

Zastosowanie nowej metody pomiaru (emisji akustycznej) bazującej na wysokoczęstotliwościowych impulsach (HFIM – *high-frequency-impulse-measurement*) umożliwia wykrywanie zmian strukturalnych w materiale podczas obróbki. Zakres badanych częstotliwości wynosi 100÷1500 kHz. Pomiar prowadzony jest w czasie rzeczyw-



Rys. 7. System monitorowania drgań Qass IM Optimizer 4D firmy Toses (www.quass.net)

wistym, poprzez porównywanie aktualnej emisji z zarejestrowanym wzorcem w odpowiednim zakresie tolerancji (rys. 7). W przypadku pojawienia się charakterystycznych, zidentyfikowanych impulsów określana jest ich przyczyna. Wysoka częstotliwość próbkowania sygnału, analiza widma i graficzna interpretacja pozwalają na identyfikowanie wszystkich zjawisk występujących podczas obróbki skrawaniem. Nazywane jest to akustycznym odciskiem palca. Urządzenie jest przydatne podczas toczenia, frezowania i szlifowania.

MZ84 – firmy Mozys

Specjalizowany system akwizycji danych (rys. 8) dedykowany do pomiarów drgań jest wyposażony w cztery główne tory pomiarowe (maksymalna częstotliwość próbkowania 100 kHz) i osiem dodatkowych (10 kHz). Wysoka rozdzielczość przetwarzania (24 bity) i indywidualne filtry antyaliasingowe umożliwiają precyzyjne śledzenie wszystkich zjawisk. Możliwe jest dołączenie czujników piezoelektrycznych IEPE (*integrated electronics piezoelectric*). Wewnętrzna, dostępna dla użytkownika pamięć urządzenia pozwala na samodzielne wprowadzanie dowolnych strategii przetwarzania pozyskiwanych danych zgodnie z opracowanym algorytmem. Do pracy nie jest potrzebny zewnętrzny komputer. System jest gotowy do użycia i może być w pełni zautomatyzowany.



Rys. 8. System monitorowania drgań MZ84 firmy Mozys (<https://mozys.de>)

Podsumowanie

Jak się wydaje, najważniejszym kryterium oceny systemów monitorowania/nadzoru jest efektywność wykrywania niekorzystnych zjawisk występujących podczas obróbki. Ich źródłem jest interakcja narzędzia i przedmiotu obrabianego, dlatego należy zwrócić szczególną uwagę na miejsce instalacji czujnika, przyjmując założenie, że im bliżej obserwowanego zjawiska umieszczony jest czujnik, tym sygnał diagnostyczny staje się bardziej symptomatyczny.

Współczesne systemy diagnostyczne najczęściej przetwarzają sygnały w oparciu o analizę widma częstotliwościowego, koherencję sygnałów drgań w dwóch różnych osiach, wykrywanie zmian siły skrawania w czasie, porównywanie fluktuacji amplitudy drgań lub zaawansowaną

analizę falkową. Aby pozyskiwane w ten sposób informacje przynosiły rzeczywiste korzyści w postaci zwiększania jakości obróbki, powinny aktywnie wpływać na parametry skrawania w procesie. Oznacza to, że bardzo ważnym zagadnieniem jest zapewnienie rzeczywistej komunikacji układu diagnostyki ze sterownikiem NC. Tylko taka interakcja gwarantuje uzyskanie pozytywnych efektów monitorowania.

Obecnie działania badawcze koncentrują się na poszukiwaniu bardziej skomplikowanych strategii i adekwatnych miar sygnału. Z perspektywy zastosowania układów nadzoru istotne jest, aby taki system:

- w analizie sygnałów uwzględniał model dynamiczny maszyny, skutecznie (online) wykrywał drgania samowzbudne, a także efektywnie dostosowywał parametry skrawania,
- był odporny na zakłócenia środowiska obróbkowego,
- nie zmniejszał sztywności i zdolności tłumiących obrabiarki,
- nie ograniczał wartości dopuszczalnych parametrów skrawania, geometrii narzędzia i wymiarów przedmiotu obrabianego.

Badania realizowane w ramach projektu „Zaawansowane techniki wytwarzania przekładni lotniczych”, nr umowy InnoLot/I/10/NCBR/2014 – INNOGEAR, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

1. Szulewski P. „Nowoczesne funkcje diagnostyczne we współczesnych sterownikach NC”. *Mechanik*. 1 (2016): s. 5–12.
2. Jemielniak K. „Obróbka skrawaniem”. Wyd. III. Warszawa: OWPW, 2012.
3. Galewski M., Kaliński K. „Nadzorowanie drgań przy frezowaniu szybkościowym smukłymi narzędziami ze zmienną prędkością obrotową”. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2009.
4. Tomkow J. „Wibrostanilność obrabiarek. Komputerowe wspomaganie obliczeń i badań doświadczalnych”. Warszawa: WNT, 1997.
5. Taejun Choi, Yung C. Shin. “On-Line Chatter Detection Using Wavelet-Based Parameter Estimation”. *J. Manuf. Sci. Eng.* 125, 1 (2003): s. 21–28.
6. Marchelek K. „Dynamika obrabiarek”. Wyd. II. Warszawa: WNT, 1991.
7. Usha Nair, Bindu M. Krishna, Namboothiri V.N.N., Nampoori V.P.N. “Permutation entropy based real-time chatter detection using audio signal in turning process”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 46 (2010): s. 61–68.
8. Szulewski P. „Metody komunikacji układów diagnostycznych ze sterownikami maszyn technologicznych”. *IM Inżynieria Maszyn*. 17, 2 (2012): s. 74–83.
9. Jemielniak K., Nejman M., Śniegulska-Grądzka D. „Analityczne i numeryczne wyznaczanie granicy stabilności przy toczeniu”. *Inżynieria Maszyn*. 17, 1 (2012): s. 81–92.
10. Yang F., Zhang B., Yu J. “Chatter suppression with multiple time-varying parameters in turning”. *Journal of Materials Processing Technology*. 141 (2003): s. 431–438.
11. Smith S., Tlustý J. “Stabilizing chatter by automatic spindle speed regulation”. *Ann. CIRP*. 41, 1 (1992): s. 433–436.
12. Tsai N.C. “Chatter prevention and improved finish of workpiece for a milling process”. Tainan, Taiwan, Republic of China: Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, 2009.
13. Liao Y.S., Young Y.C. “A new on-line spindle speed regulation strategy for chatter control”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 36 (maj 1996): s. 651–660.
14. Bediaga I. i in. “An automatic spindle speed selection strategy to obtain stability in high-speed milling”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 49 (2009): s. 384–394.
15. Szulewski P. „Możliwości komunikacji układu diagnostycznego ze sterownikiem obrabiarki”. *Mechanik*. 8–9 (2013): s. 427–438. ■