

Sensory we współczesnych obrabiarkach sterowanych numerycznie

Sensors in the contemporary CNC machine tools

WACŁAW SKOCZYŃSKI
MAREK STEMBAŁSKI
ANDRZEJ ROSZKOWSKI
TOMASZ JANKOWSKI
PAWEŁ TUREK
PAWEŁ PIÓRKOWSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.518

Celem pracy jest przedstawienie postępów w dziedzinie zastosowań różnych sensorów w obrabiarkach sterowanych numerycznie. Omówiono współczesne napędy obrabiarek i układy pomiaru położenia. Wskazano na przyczyny monitorowania nowoczesnych systemów wytwórczych i opisano stosowane układy diagnostyki i nadzoru. Przedstawiono wybrane inteligentne rozwiązania mechatroniczne w dziedzinie obrabiarek, których celem jest ograniczenie różnego rodzaju błędów obróbki.

SŁOWA KLUCZOWE: obrabiarka, diagnostyka, sensory, układy mechatroniczne

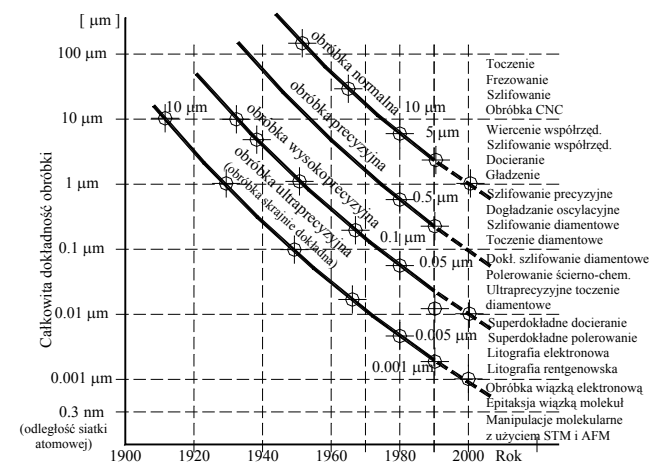
The aim of the study was to present the progress in the application of a variety of sensors and mechatronic systems in numerically controlled machine tools. Modern machine tools drives and position measurement systems were discussed. The reasons for modern manufacturing systems monitoring were indicated and diagnostic and supervision systems employed in machine tools were described. Some selected intelligent mechatronic solutions in the field of machine tools whose aim is to reduce various types of machining errors were presented.
KEYWORDS: machine tool, diagnostics, sensors, mechatronic systems

Rozwój technologiczny obrabiarek napotyka na sprzeczności tkwiące w wymaganiach dotyczących dokładności i wydajności obróbki [16]. Skutkuje to stale rosnącymi wymaganiami związanymi z oczekiwaną dokładnością obróbki (rys. 1) [22]. Biorąc to pod uwagę można się spodziewać, że przyszłe wymagania eksploatacyjne obrabiarek będą zmierzały również w kierunku technologii obróbki w skali mikro i nano [16]. W związku z tym, można wywnioskować, że sprzeczność stwarzana przez żądanie zarówno dokładności produkcji w dużych obszarach roboczych, jak i elastyczności i niezawodności produkcji wymaga stworzenia dla obrabiarek uniwersalnej architektury systemowej z typowymi cechami systemów mechatronicznych – zdolności do konwersji (rekonfiguracji) i samoopimalizacji (odporności na zakłócenia) [16]. Na podstawie badań statystycznych przeprowadzonych wśród klientów i producentów określono konkretne oczekiwania w zakresie rozwoju obrabiarek [16]:

- wzrost dyspozycyjności jako wynik: możliwości planowania obsługi serwisowej i napraw (redukcja czasu przestoju), monitorowania stanu i procesu, inteligentnego utrzymania ruchu, funkcji diagnostycznych;

* Dr hab. inż. Wacław Skoczyński, prof. PWr (waclaw.skoczyński@pwr.edu.pl), dr inż. Marek Stembalski (marek.stembalski@pwr.edu.pl), dr inż. Andrzej Roszkowski (andrzej.roszkowski@pwr.edu.pl), dr inż. Tomasz Jankowski (tomasz.jankowski@pwr.edu.pl), mgr inż. Paweł Turek (pawel.turek@pwr.edu.pl), mgr inż. Paweł Piórkowski (pawel.piorowski@pwr.edu.pl) – Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych

- wysoce ekonomiczne wytwarzanie dzięki: funkcjonalnie zorientowanej konstrukcji, zwiększonej wydajności spowodowanej dynamiką napędu, elastyczności w wyniku rekonfiguracji.



Rys. 1. Postępy i oczekiwania w dziedzinie dokładności obróbki [22]

Nowoczesne obrabiarki CNC są zaawansowanymi systemami mechatronicznymi, którym stawia się bardzo wysokie wymagania dotyczące zarówno wydajności obróbki, jakości wytwarzanych elementów, niezawodności, jak i efektywności, z uwzględnieniem kosztów produkcji, zasobów i zużycia energii. Istnienie i funkcjonowanie takich systemów umożliwiają inteligentne komponenty obrabiarki, które w postaci integracji różnych czujników, członów wykonawczych i oprogramowania pozwalają na monitorowanie procesów obróbki i stanów obrabiarek oraz umożliwiają aktywne wpływanie na warunki procesu.

Celem pracy jest przedstawienie postępów w dziedzinie zastosowań różnych sensorów na tle rozwoju obrabiarek sterowanych numerycznie.

Znaczenie sensorów w systemach wytwórczych

W ciągu ostatnich dekad w obszarze technologii wytwarzania nastąpił ogromny postęp, którego głównym celem było podniesienie dokładności wyrobów i wydajności produkcji. Znaczący w tym udział miało wprowadzenie obrabiarek sterowanych numerycznie, gdyż stymulowany przez nie postęp technologiczny skutkowało wzrostem niezawodności procesu obróbki. Dalszy postęp dokonał się dzięki rozwojowi sensorów i wprowadzeniu technologii komputerowych, które stanowiły niezbędne narzędzia do zapewnienia sterowania procesu obróbki wspomaganego systemami monitorowania. Obecnie złożone układy sterowania, wyposażone w dziesiątki różnych czujników występują zarówno w pojedynczych obrabiarkach sterowa-

nych numerycznie, jak i w systemach wielomaszynowych, takich jak na przykład gniazda wytwórcze lub elastyczne systemy wytwórcze.

W nowoczesnych systemach wytwórczych technologia monitorowania z użyciem odpowiednich sensorów nabiera kluczowego znaczenia. Jest to spowodowane następującymi względami [24]:

- obrabiarki pracują z prędkościami, które nie pozwalają na ręczną interwencję obsługi, chociaż kolizje lub uszkodzenia mechaniczne pochodzące od procesu mogą powodować znaczące awarie;
- systemy wytwórcze stają się coraz większe i monitorowanie takich rozbudowanych systemów leży już poza możliwościami percepcji człowieka;
- wzrost kosztów pracy oraz brak wykwalifikowanych operatorów wymaga działania systemu wytwórczego przy minimalnej ingerencji człowieka, zatem koniecznością jest wprowadzanie zaawansowanych systemów monitorowania;
- wytwarzanie ultraprecyzyjne może być osiągnięte tylko przy wsparciu zaawansowanej metrologii i technologii monitoringu procesu;
- użycie wyrafinowanych obrabiarek wymaga integracji systemów monitorowania w celu zabezpieczenia maszyny przed awarią;
- proces obróbki zgrubnej, wymagający dużego zużycia energii, ze względów bezpieczeństwa powinien być przeprowadzony przy minimalnej ingerencji obsługi;
- świadomość ekologiczna we współczesnym wytwarzaniu wymaga również monitorowania emisji różnych czynników pochodzących z procesu obróbki.

Rozwój obrabiarek sterowanych numerycznie zawsze podyktowany był pewnymi potrzebami, jakie pojawiały się na rynku. Były one i są stymulatorami rozwoju w dziedzinie systemów wytwórczych. Róższerynym celem pracy jest przedstawienie nie tylko postępów w dziedzinie zastosowań różnych sensorów w obrabiarkach sterowanych numerycznie, lecz również aplikacji z układami mechatronicznymi.

Zespoły napędowe i pomiaru położenia obrabiarek

W obrabiarkach są wykorzystywane różne silniki elektryczne. Ich zestawienie przedstawiono w tabelicy [1]. W napędach posuwu zazwyczaj są stosowane synchroniczne silniki prądu przemiennego z magnesami trwałymi, a w napędach wrzecion obrabiarek silniki asynchroniczne [1]. Pierwszy rodzaj serwonapędów przyjęto ze względu na duży stopień ich efektywności i związane z nią niższe nagrzewanie, a napędy asynchroniczne ze względu na ich zdolności do pracy w warunkach przeciążenia. Typowe napędy posuwu mają moc nominalną do 20 kW oraz zakres prędkości do 8000 obrotów na minutę, a moc napędów głównych wrzecion może dochodzić nawet do 100 kW, natomiast zakres prędkości wrzeciona mieści się w przedziale 20–60 000 obrotów na minutę [1].

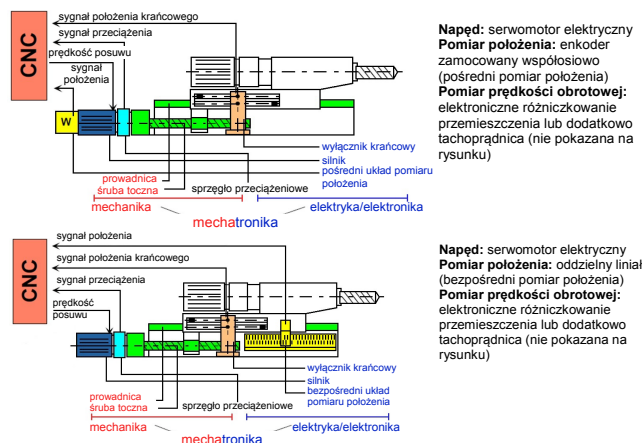
Układy pomiarowe położenia i przemieszczenia w jednostkach posuwowych stanowią kluczowe podzespoły każdej obrabiarki sterowanej numerycznie, gdyż decydują o jej podstawowych własnościach funkcjonalnych, które są racją jej istnienia. W celu uzyskania wysokiej dokładności pozycjonowania każdy serwonapęd posuwu musi być wyposażony jest w czujnik prędkości obrotowej i położenia zespołu ruchowego (rys. 2), a często dodatkowo w akcelerometr i czujnik obciążenia. Wyjątek stanowią układy wyposażone w silniki krokowe, które z racji swojej budowy nie wymagają instalowania czujników położenia, ale mają one marginalne zastosowanie w obrabiarkach z uwagi na ograniczenia w przenoszeniu większego momentu obrotowego.

TABLICA. Silniki stosowane w napędach obrabiarek, typowe zastosowania i ich charakterystyka [1]

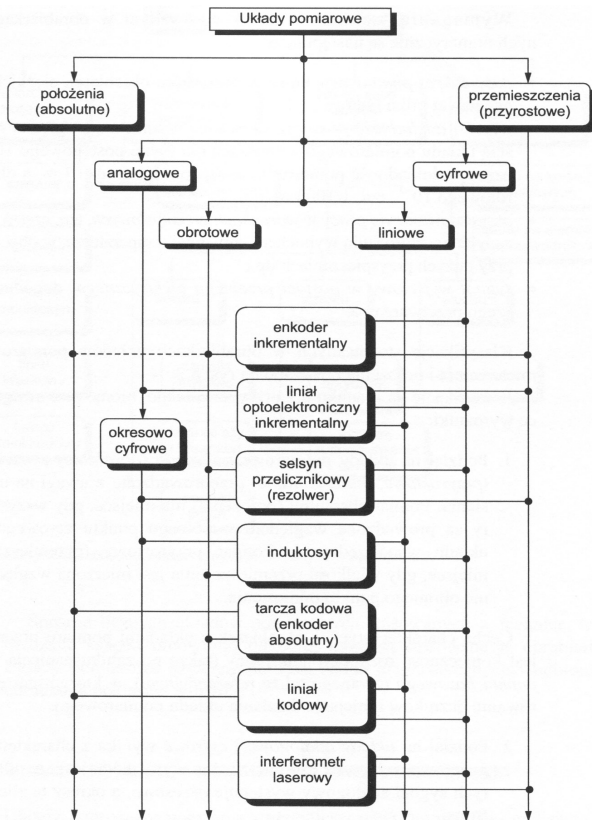
Typ silnika	Typowe zastosowania	Zalety	Wady
Silniki szczotkowe prądu stałego	Pojedyncze zastosowania w ograniczonym zakresie Aplikacje z największymi prędkościami powyżej 100 000 obr/min Napęd posuwu dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych	Dobre własności dynamiczne Proste i tanie Wyglądzona prędkość Szeroki zakres prędkości	Dynamika ograniczona przez komutator Zużywanie się komutatora
Silniki synchroniczne	Napędy posuwu dla obrabiarek Bezdrzewniowe liniowe napędy bezpośrednie o najwyższej dokładności <10 nm Napędy koło zębate – zębalka z prędkością posuwu do 400m/min	Bardzo dobre własności dynamiczne Bezobsługowe Generowanie ciepła w statorze Zdolność do dużych przeciążeń	Drogie Ograniczona prędkość Wymagają dobrego czujnika położenia
Silniki asynchroniczne	Napędy wrzecion frezarek lub tokarek o mocy/momencie większych niż 40kW/100Nm	Bardzo dobre własności dynamiczne Bezobsługowe Zdolność do dużych przeciążeń Najwyższe wartości znamionowe mocy	Wymagają złożonego kontrolera Źródło ciepła w rotorze Mniejsza efektywność

Do pomiaru prędkości obrotowej silnika są wykorzystywane prądnice tachometryczne, które generują napięcie stałe, proporcjonalne do prędkości kątowej wału. Są one zintegrowane z wałem silnika. Ze względu na ograniczoną żywotność szczotek współpracujących z komutatorem wprowadzono rozwiązanie bezszczotkowe w postaci tachoprądnicy prądu przemiennego. Generują one trapezoidalne napięcie zmienne o częstotliwości i amplitudzie proporcjonalnej do prędkości obrotowej wału silnika [1]. Niestety mały stosunek sygnału do szumu występujący w obu typach prądnic przy małych prędkościach obrotowych wpływa negatywnie na sterowanie prędkością serwonapędu posuwu, zwłaszcza podczas pozycjonowania zespołu ruchowego. Z tego względu stosowane jest rozwiązanie, w którym prędkość obrotowa jest szacowana na podstawie cyfrowego różniczkowania sygnału położenia uzyskanego z enkodera. Dokładność oszacowania prędkości zależy od rozdzielczości enkodera, kroku kwantyzacji sygnału, prędkości i harmonicznych błędów częstotliwości [1]. W celu wygładzenia oszacowania prędkości są stosowane dwa filtry: dolnoprzepustowy i o skończonej odpowiedzi impulsowej.

Precyzyjne pozycjonowanie narzędzia względem przedmiotu obrabianego wymaga zainstalowania w każdym serwonapędzie posuwu odpowiedniego przetwornika pomiarowego. Pomiar położenia zespołu ruchowego odbywa się w sposób bezpośredni lub pośredni na podstawie ustalenia położenia kątowego wału silnika. W precyzyjnych obrabiarkach położenie zespołu ruchowego mierzone jest bezpośrednio z użyciem interferometru laserowego. W większości obrabiarek sterowanych numerycznie do pomiaru położenia w kierunku osi posuwowych stosuje się jednak liniowe enkodery (pomiar bezpośredni) lub śruby toczne w połączeniu z enkoderami obrotowymi (pomiar pośredni). Ich klasyfikacja, przedstawiona na rys. 3 uwzględnia stosowany układ odniesienia (pomiar absolutny lub inkrementalny).



Rys. 2. Schemat serwonapędów posuwu z układem pomiaru położenia: a) pośrednim, b) bezpośrednim [21]



Rys. 3. Klasyfikacja stosowanych w obrabiarkach układów pomiarowych przemieszczenia i położenia [10]

ny), typ generowanych sygnałów wyjściowych (analogowe lub cyfrowe) i rodzaj mierzonego ruchu (liniowy lub obrotowy). Przetworniki liniowe i obrotowe wykorzystują podobne zasady działania. Dominują rozwiązania optoelektroniczne, magnetyczne i indukcyjne.

Spośród tych rozwiązań największą dokładnością charakteryzują się enkodery optyczne. W enkoderach tych są wykorzystywane dwie metody skanowania:

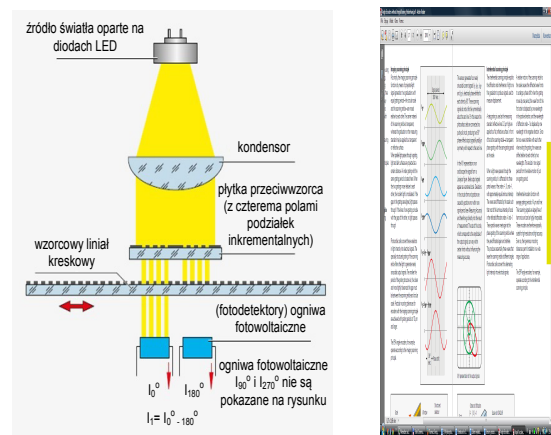
- metoda skanowania obrazowego dla stałej rozstawu szczelin podziałki kreskowej od $10\ \mu\text{m}$ do około $70\ \mu\text{m}$,
- metoda skanowania interferencyjnego dla bardzo precyzyjnych podziałek kreskowych z rozstawem szczelin $4\ \mu\text{m}$ i mniejszym.

Zasada skanowania obrazowego wykorzystuje generowanie sygnału rzutowanego światła na dwie podziałki kreskowe o równym rozstawie szczelin: podziałkę wzorcową (kołową lub liniową) i płytkę przeciwwzorca (skanującą), w której znajdują się cztery przesunięte względem siebie pola podziałek (rys. 4) [2]. Materiał nośnika płytki skanującej jest przezroczysty, podczas gdy podziałka wzorcową może być naniesiona na powierzchnię przezroczystą lub odbijającą. Gdy podziałki poruszają się względem siebie, padające światło jest modulowane i pada na 4 fotodetektory, które generują cztery prawie sinusoidalne sygnały prądowe (I_0 , I_{90} , I_{180} i I_{270}) z elektrycznie przesuniętą fazą co 90° (rys. 4). Fotodetektory (ogniwa fotowoltaiczne) łączy się w układzie przeciwsobnym (po dwie pary sygnałów, które są przesunięte względem siebie o 180° , a następnie podawane na dwa wzmacniacze różnicowe) wytwarzające dwa sygnały wyjściowe I_1 i I_2 (rys. 4), które są względem siebie przesunięte w fazie o 90° i symetryczne w stosunku do linii zerowej [2]. Sygnały te następnie trafiają do wejścia kwadraturowego wzmacniacza pomiarowego. Na podstawie przesunięcia sygnałów I_1 i I_2 ($+90^\circ$ lub -90°) układ pomiarowy rozpoznaje kierunek obrotów wrzeciona.

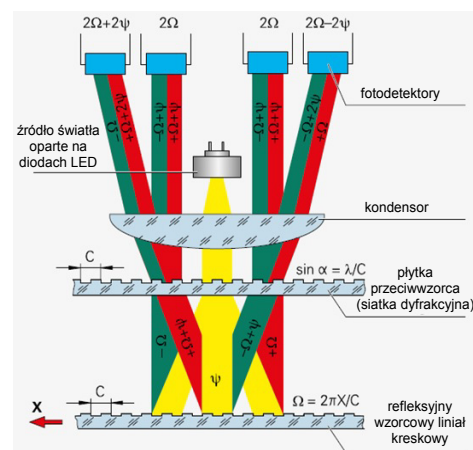
Interferencyjna zasada skanowania wykorzystuje zjawiska interferencji i dyfrakcji światła na podziałce kreskowej

przeciwwzorca w celu wytworzenia sygnałów wykorzystywanych do pomiaru przemieszczenia. Jako siatkę wzorcową stosuje się liniał kreskowy w postaci odbłaskowych prążków o wysokości $0,2\ \mu\text{m}$, który jest umieszczony na płaskiej, powierzchni odbłaskowej. Między źródłem światła a liniałem wzorcowym umieszcza się przeciwwzorczec w postaci przezroczystej podziałki z dyfrakcyjną siatką fazową, z takim samym rozstawem prążków jak na podziałce wzorca pomiarowego (rys. 5) [2]. Gdy fala światła przechodzi przez siatkę dyfrakcyjną przeciwwzorczec jest załamana na trzy fale częściowe rzędów -1 , 0 i 1 , o równym w przybliżeniu natężeniu światła. Fale ulegają na tej siatce załamaniu w taki sposób, że większość natężenia światła występuje w falach odbitych $+1$ i -1 rzędu ugięcia. Te fale częściowe spotykają się ponownie na podziałce przeciwwzorczec z siatką fazową, gdzie po raz drugi ulegają ugięciu i interferują. To wytwarza w zasadzie trzy fale, które opuszczają siatkę skanującą pod różnymi kątami. Ogniwa fotowoltaiczne przetwarzają to zmienne natężenie światła w sygnały elektryczne [2].

Przyspieszenia mogą być włączone do pętli sprzężenia zwrotnego w układach sterowania napędów posuwu i wykorzystane do tłumienia dynamiki napędu i kontroli rzeczywistej trajektorii przemieszczanego zespołu. Mogą być one mierzone bezpośrednio z użyciem akcelerometrów lub pośrednio na podstawie wyznaczenia drugiej pochodnej z rejestrowanych sygnałów położenia [1]. W odniesieniu do napędów wadą standardowych akcelerometrów piezoceramicznych jest pomiar przyspieszeń bezwzględnych zespołów ruchomych, co oznacza, że zmierzone sygnały są superpozycją drgań całej struktury obrabiarki i interesujących nas drgań tych zespołów względem prowadnic (nieruchomej bazy).



Rys. 4. Zasada skanowania obrazowego [2, 19]



Rys. 5. Schemat optyczny interferencyjnej metody skanowania (C – stała siatki (podziałki kreskowej), – przesunięcie fazy fali światła po przejściu przez siatkę przeciwwzorczec, – przesunięcie fazy fali światła spowodowane ruchem wzorcowej podziałki pomiarowej w kierunku x) [2]

Z kolei pośredni pomiar przyspieszeń jest najczęściej obciążony błędami podwójnego różniczkowania.

Sygnał prądowy jest wykorzystywany w pierwszej pętli regulatora kaskadowego serwonapędu posuwu, w którym w postaci odpowiedniego prądu przez regulator PI zadaje się wartości siły lub momentu. Prąd jest również stosowany do kompensowania zakłóceń pochodzących od tarcia i siły skrawania [1]. Prąd jest mierzony z użyciem rezystorów bocznikowych, transformatorów indukcyjnych lub z wykorzystaniem zjawisk magnetycznych. Spadek napięcia na zaciskach rezystora bocznikowego jest proporcjonalny do prądu płynącego przez ten rezystor. Metoda ta ma kluczowe znaczenie w szerokim zakresie częstotliwości. Indukcyjne przekładniki prądowe działają przekształcając prąd fazy silnika przez sprzężenie magnetyczne, co prowadzi do otrzymania sygnału napięciowego, proporcjonalnego do natężenia prądu przemiennego. Do pomiaru indukowanego prądowo pola magnetycznego najczęściej są stosowane czujniki Halla, które z uwagi na ograniczoną szerokość pasma częstotliwości są zastępowane przez półprzewodnikowe elementy o przepustowości około 1 MHz, wykorzystujące zjawisko gigantycznej magnetorezystancji [1].

Układy diagnostyki i nadzoru obrabiarek

Bezobsługowa praca obrabiarek wymaga nadzorowania wszystkich jej układów funkcjonalnych. Oznacza to konieczność nadzorowania stanu narzędzia skrawającego, pracy obrabiarki, procesu obróbki i przedmiotu obrabianego. Do monitorowania obrabiarek są wykorzystywane różne typy czujników (rys. 6) [15]. W warunkach przemysłowych najczęściej są stosowane czujniki siły, mocy pobieranej przez silniki układów napędowych oraz emisji akustycznej [7]. Równie często są stosowane czujniki położenia, przyspieszenia w ruchu drgającym lub temperatury. Wszystkie wymienione metody pomiarowe mają na celu natychmiastowe wykrycie uszkodzenia narzędzia (np. stopienia krawędzi skrawającej lub jej wykruszenia), którego praca jest nadal w toku, w celu zapobieżenia dalszemu uszkodzeniu tego narzędzia lub przedmiotu obrabianego, a w skrajnym przypadku zapobieżenia produkcji braków.

Do głównych zadań nadzoru narzędzia należy [17]:

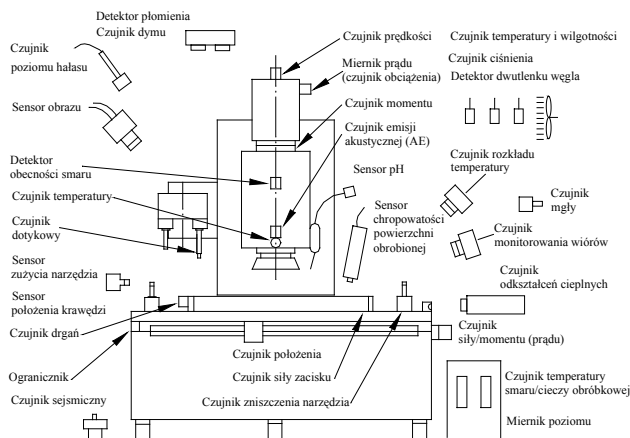
- wykrywanie pęknięć narzędzia,
- detekcja zużycia narzędzi, w szczególności bardzo małych narzędzi (o średnicy nawet poniżej 0,1 mm) i wielowrzecionowych głowic wiertarskich,
- ochrona obrabiarki przez wykrywanie dużych obciążeń narzędzia, które przekraczają wartości „wyczone” modelu obciążenia,
- kontrola wymiarowa przedmiotów obrabianych.

Często diagnostyka stanu narzędzia jest realizowana z diagnostyką procesu skrawania. W tym zakresie prowadzona jest [11]:

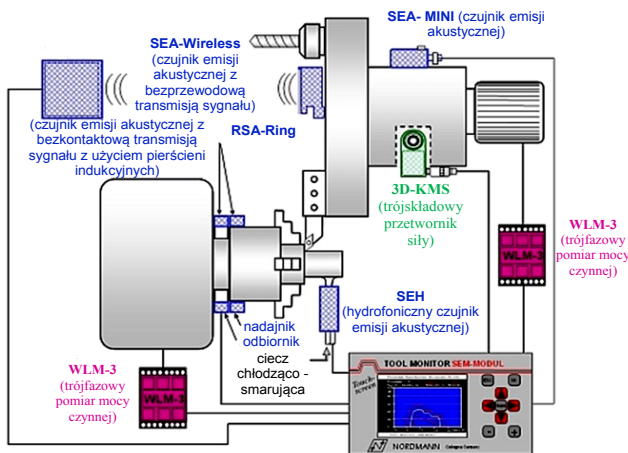
- diagnostyka postaci wióra,
- wykrywanie nadmiernych drgań,
- wykrywanie powstawania narostu lub zadziorów.

Narzędzia mogą być monitorowane podczas trwania procesu skrawania i po jego realizacji. W pierwszym wypadku są stosowane metody pośrednie (pomiar mocy czynnej, siły skrawania lub emisji akustycznej), a w drugim bezpośrednio (kontrola geometrii ostrza narzędzia przed lub po obróbce, wykorzystanie macek, barier świetlnych, itp.). Zasadniczo narzędzia powinny być kontrolowane podczas procesu, a małe narzędzia także mogą lub muszą być kontrolowane po zakończeniu procesu [17].

Wszystkie czujniki pomiarowe muszą być w pełni zintegrowane z obrabiarką. Przykładowe czujniki do pośredniego monitorowania narzędzia w tokarce CNC podczas realizacji procesu skrawania przedstawiono na rys. 7. Wśród nich



Rys. 6. Rodzaje sensorów mogących znaleźć zastosowanie w układach nadzoru obrabiarek sterowanych numerycznie [15]



Rys. 7. Możliwe położenia sensorów do monitorowania narzędzia w tokarce CNC [17]

znajdują się układy do pomiaru składowych siły skrawania, mocy czynnej napędu głównego i posuwu oraz emisji akustycznej z przewodową i bezprzewodową transmisją sygnałów. Ciekawym rozwiązaniem jest czujnik hydrofonowy SEH, który do przenoszenia sygnału emisji akustycznej wykorzystuje strumień cieczy chłodząco-smarującej.

Stykowe i laserowe sondy obrabiarkowe umożliwiają automatyczne ustawianie narzędzi i przedmiotu oraz dokonywanie pomiarów podczas cyklu zapewniając możliwość weryfikacji zarówno procesu jaki i przedmiotu obrabianego [19]. Do bezpośredniego ustawiania narzędzi i wykrywania ich uszkodzeń służą sondy stykowe i bezstykowe rys. 8. [19]. Do odczytu położenia narzędzi wykorzystują one układy pomiarowe osi sterowanych obrabiarek. Są w pełni zintegrowane z układami sterowania tych obrabiarek. Procedura pomiaru jest programowana i wywoływana w układzie sterowania maszyny. W przypadku pomiaru dotykowego narzędzie najężdża na czujnik sondy narzędziowej, a po dotknięciu płytki pomiarowej czujnika następuje rozwarcie jego zestyków, które stanowi sygnał dla układu sterowania, aby zapamiętać aktualną współrzędną odczytaną z układów pomiarowych obrabiarki. Podczas pomiaru bezdotykowego narzędzie najężdża na promień laserowy i przecina go wyzwalając pomiar. Sonda optyczna wykorzystuje zjawisko przesłonięcia promienia świetlnego lub zmiany poziomu oświetlenia. Przy pomocy tych sond istnieje możliwość pomiaru narzędzia zarówno przed obróbką (sprawdzanie położenia krawędzi skrawających) w celu wprowadzenia korekcji do programu obróbkowego, a także w trakcie procesu w celu kompensacji zużywającego się ostrza [19]. Niektóre z nich mają również funkcję

pomiaru zużycia ostrza, np. [4]. Do komunikacji z układem sterowania sondy wykorzystują różne rodzaje interfejsów (radiowy, optyczny, przewodowy).

Metody diagnostyczne związane ze zmianą postaci wióra wykorzystują różne czujniki pomiarowe:

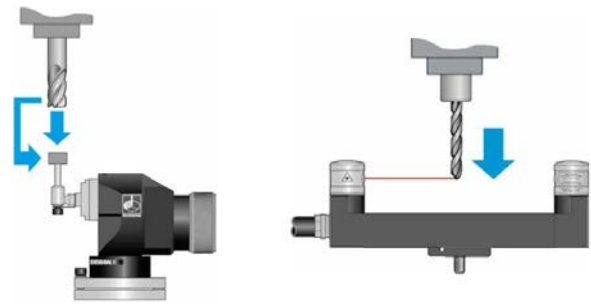
- kamery termowizyjne w celu rejestracji promieniowania ciepłego wiórow (spiętrzające się wióry są źródłem zwiększonej emisji promieniowania ciepłego),
- czujniki emisji akustycznej – w przebiegu czasowym emisji akustycznej występują składowe o charakterze impulsów (ich źródłem jest między innymi łamanie się wióra); w wypadku krótkiego wióra przebieg sygnału ma postać ciągu impulsów, a ciągłemu wiórowi odpowiadają przebiegi o stosunkowo niewielkich zmianach amplitudy,
- siłomierze – występuje wyraźna różnica widma częstotliwościowego składowej posuwowej siły skrawania przy wiórze ciągłym i przy występowaniu łamania wióra,
- kamery CCD z systemem przetwarzania obrazu do automatycznej detekcji pojawiających się wiórow ciągłych.

Sondy przedmiotowe stanowią również, podobnie jak sondy narzędziowe, powszechnie stosowane wyposażenie obrabiarek sterowanych numerycznie. Systemy pomiarów w cyklu produkcyjnym wprowadzają do obrabiarek pewien poziom inteligencji, jaka jest im potrzebna do samodzielnego podejmowania decyzji [19]. Umożliwia to bezobsługową obróbkę w dłuższych okresach czasu i zapewnia zwiększenie wydajności produkcji. Sondy przedmiotowe oprócz sprawdzania wymiarów przedmiotów obrabianych, mogą spełniać również inne funkcje, takie jak np.: kontrola stanu narzędzia, identyfikacja przedmiotów, kontrola ustawienia przedmiotów w celu korekcji błędów ich mocowania na paletach i palet na stole, korygowanie błędów położenia stołu obrotowego [10]. Najprostszą budowę ma sonda elektrostrykowa przedstawiona na rys. 9 [19]. Bardziej zaawansowane i precyzyjniejsze sondy przedmiotowe wykorzystują do wyzwiania pomiaru sygnał z wbudowanych czujników piezoelektrycznych, tensometrycznych lub optycznych.

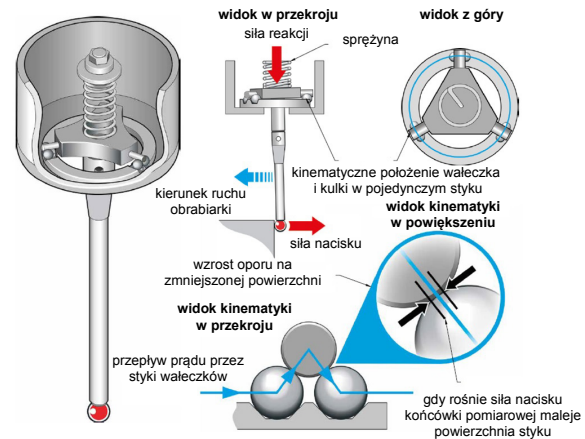
W dziedzinie diagnostyki stanu technicznego obrabiarek rozpowszechniły się pomiary z wykorzystaniem teleskopowego pręta kinematycznego z dwoma przegubami, zwanego ballbarem (rys. 10a) [3]. System QC20-W typu ballbar oferuje szybką i efektywną metodę kontroli dokładności obrabiarek CNC. Testowanie obrabiarki polega na zaprogramowaniu prostych ścieżek narzędzia po łuku okręgu, na zrealizowaniu tego programu i bardzo dokładnym mierzeniu promienia tego łuku oraz porównaniu go z zaprogramowaną ścieżką. Oprogramowanie umożliwia przeprowadzenie diagnostyki aż 19 błędów (np. odchyłki okrągłości, luzu zwrotnego, błędu nadążania, odchyłki prostopadłości) [3]. Wyniki testu (rys. 10b) są miarą stanu technicznego obrabiarki. Można je wykorzystywać w planowaniu obsługi serwisowej i napraw obrabiarki.

Dalszy rozwój innowacyjnych systemów monitoringu obrabiarek zmierza w kierunku następujących działań i kluczowych technologii wspomagających [23]:

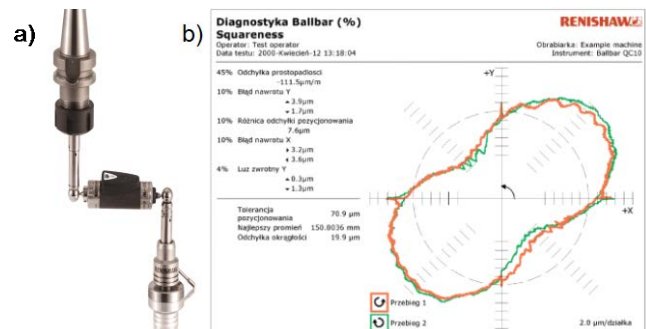
- łączenie pojedynczych autonomicznych czujników (dotąd stosowanych) w inteligentne systemy monitorowania i kontroli procesów, narzędzi i maszyn (efekt synergii wynikający z integracji wielu sygnałów pomiarowych);
- rozwój innowacyjnych technik przetwarzania sygnałów i danych przy pomocy narzędzi i metod poznawczych w celu wprowadzenia zaawansowanych systemów czujnikowych do monitoringu wytwarzania;
- rozwój systemów monitorowania złożonych z inteligentnych czujników, które posiadają zdolności do samo-kalibracji, samo-diagnostyki, kondycjonowania sygnału i podejmowania decyzji.



Rys. 8. Schemat działania stykowej i laserowej bezstykowej sondy narzędziowej [19]



Rys. 9. Zasada działania sondy elektrostrykowej [19]

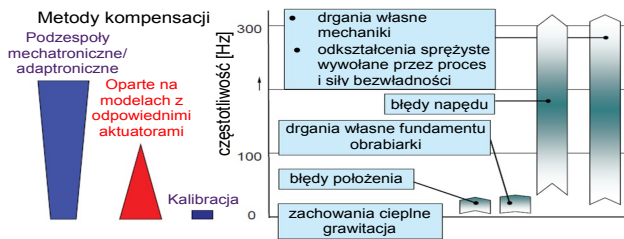


Rys. 10. a) System QC20-W ballbar do diagnostyki stanu technicznego obrabiarek [3], b) przykładowy wynik testu

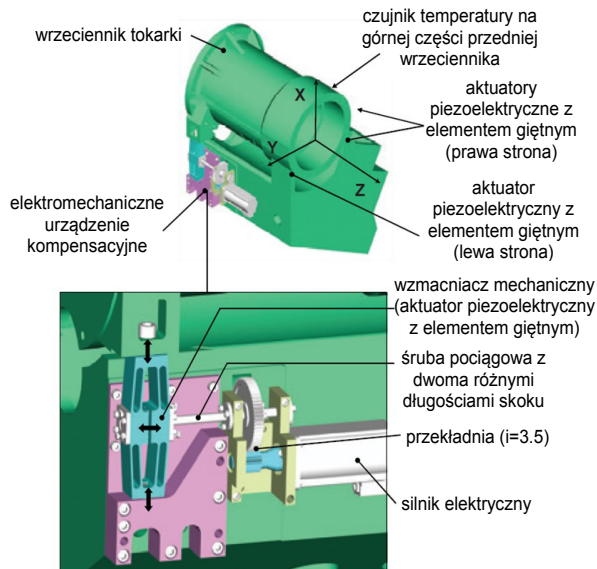
Aplikacje funkcji inteligentnych w obrabiarkach

Dalszy rozwój obrabiarek jest związany z aplikacjami funkcji inteligentnych, które dotyczą redukcji błędów (rys. 11), zapobiegania drganiom samowzbudnym i stanom awaryjnym oraz związanym z optymalizacją procesu obróbki [13]. Wszystkie z tym związane działania stały się możliwe dzięki upowszechnieniu układów sterowania cyfrowego i wprowadzaniu różnych rozwiązań mechatronicznych, które koncentrują się na trzech głównych obszarach [16]:

- implementacji modeli, które z wewnętrznymi serwonapędami obrabiarki są wykorzystywane przez układ sterowania do zmniejszenia błędów obróbki (np. do kompensacji przemieszczeń termicznych);
- doskonaleniu podzespołów mechatronicznych obrabiarki (w szczególności napędów głównych i posuwu);
- integracji dodatkowych rozwiązań mechatronicznych w podzespołach obrabiarek (np. usuwanie usterek obrabiarki za pomocą niezależnych podzespołów, które są umieszczone blisko źródła zakłóceń i działają bezpośrednio jako napędy pomocnicze w celu skompensowania błędów wymiarowych lub w celu poprawy przebiegu kontrolowanego procesu).



Rys. 11. Szerokość pasma błędów obrabiarek i opcje ich kompensacji [16]



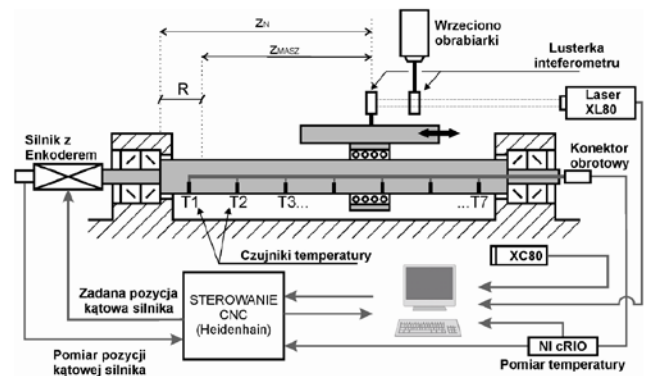
Rys. 12. Zespół elektromechaniczny do kompensacji przechyłu wrzecienika wywołanego czynnikami termicznymi [16]

Do elementów mechatronicznych w obrabiarence należą również różne modele. Celem wykorzystania modelu obrabiarki do sterowania jej mechanizmami jest polepszenie jej osiągnięć. Dzięki temu, że jej zachowanie jest opisane tym modelem, może być ono prognozowane przez sam układ sterowania. Dostępne modele mogą być wykorzystane do [16]:

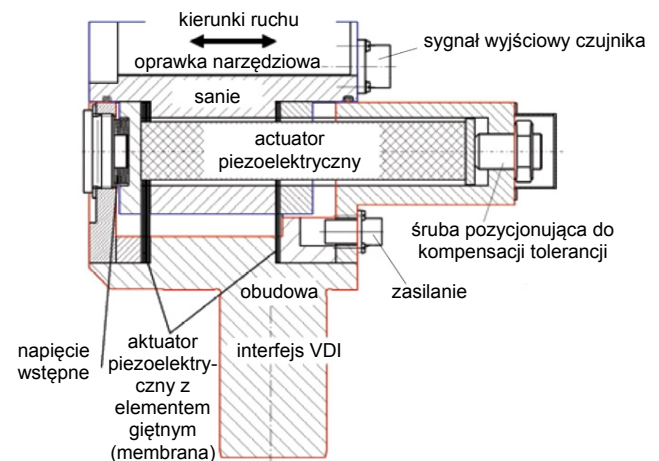
- kompensacji błędów kinematycznych (model kalibracji);
- przetwarzania sygnałów dodatkowych czujników stanów;
- kompensacji dynamicznej;
- kompensacji termicznej;
- przewidywania awarii poprzez wykrywanie wszelkich odchyśleń od normalnego zachowania;
- unikania stanów krytycznych (drgań samowzbudnych) dzięki prognozowaniu (na bazie modelu) obszarów niestabilności;
- budowy opartych na regułach modeli decyzyjnych w celu osiągnięcia stabilnej strefy obróbki.

Kompleksowa kompensacja odkształceń termicznych z wykorzystaniem regulacji osi sterowanych jest możliwa tylko w obrabiarkach 5-osiowych [16]. W szczególności w przypadku tokarek przechył wrzecienika nie mogą być całkowicie skompensowane przez osie sterowane. Integracja dodatkowych członów wykonawczych i czujników pozwala na aktywną kompensację tych przechyłów. Możliwe rozwiązanie tego problemu przedstawiono na rys. 12 [16].

W celu skompensowania wywołanego czynnikami termicznymi przechyłu tego wrzecienika wokół osi Y zastosowano dodatkowy napęd elektromechaniczny zintegrowany z wrzecienikiem. W zależności od zmierzonej temperatury, silnik krokowy za pośrednictwem przekładni napędza śrubę z gwintem trapezowym, która oddziałuje na aktuator zmieniając jego długość. Powoduje to ruch przechyłu kompensacyjnego wokół osi Y. Wywołany termicznie błąd przechyłu wrzecienika może być skompensowany w ponad 90% [16].



Rys. 13. Schemat układu kompensacji odkształceń cieplnych śruby pociągowej obrabiarki [18]



Rys. 14. Dodatkowa, dokładna oś sterowana w dużej tokarce [9]

W pracy [18] wykorzystano model kompensacji odkształceń cieplnych śruby pociągowej obrabiarki sterowanej numerycznie. Model ten opiera się na architekturze sieci neuronowych. Wewnątrz śruby pociągowej zostały zainstalowane czujniki pomiaru temperatury (rys. 13). Na podstawie zmierzonej temperatury i opracowanego modelu są wyznaczone wymagane korekty długości śruby, które są przesyłane do systemu sterowania CNC obrabiarki. Położenie zespołu ruchowego obrabiarki jest korygowane o zamodelowaną wartość odkształceń cieplnych. System ten umożliwia realizację korekty położenia w trybie on-line.

W przypadku ciężkich obrabiarek dokładność pozycjonowania osi sterowanej może być ograniczona przez tarcie w połączeniu przewodnicowym, pomimo wystarczającej rozdzielczości układu pomiaru położenia. Mechatroniczne podejście umożliwia zwiększenie lokalnej dokładności pozycjonowania dzięki zastosowaniu dodatkowej, lżejszej, ale dokładniejszej osi sterowanej. W tym celu wykorzystuje się układy napędowe i wzmacniacze z ceramiką piezoelektryczną. Czynnikiem decydującym o dokładności pozycjonowania jest konfiguracja obu systemów pomiarowych. Jeśli obie redundantne osie NC mają oddzielne systemy pomiaru położenia, to po szeregowym połączeniu układów pomiarowych możliwe jest tylko uzyskanie względnej (w stosunku do podstawowych osi NC) poprawy dokładności [16]. Stąd muszą być wzięte pod uwagę ograniczone możliwości sterowania osią podstawową i w końcowej fazie pozycjonowania oś tą wyłącza się (np. przez zaciśnięcie), a uruchamiana jest dokładniejsza oś sterowana.

Podobnym podejściem jest zintegrowanie redundantnego układu pomiarowego w ten sposób, że są rejestrowane błędy podstawowych osi NC i następnie mogą być skompensowane na drugiej, dokładniejszej osi NC [16]. Dzięki temu możliwe jest osiągnięcie poprawy dokładności.

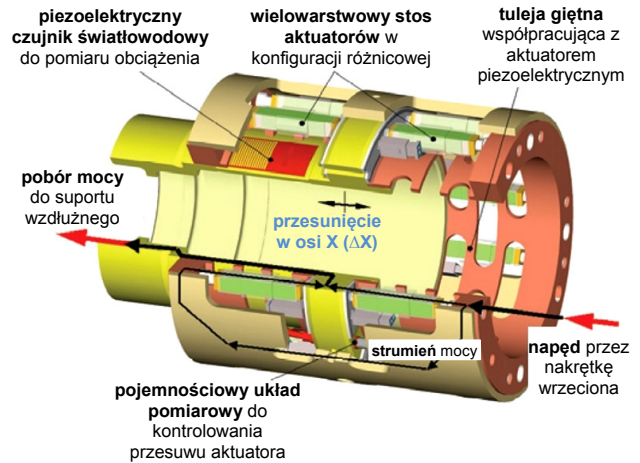
Podejście takie, którego celem było zwiększenie dokładności pozycjonowania z wykorzystaniem redundantnych osi zastosowano dla dużej tokarki CNC (rys. 14) [9].

W pracy [16] przedstawiono z kolei rozwiązanie zapewniające zwiększenie osiowej sztywności dynamicznej napędu śrubowego. Autonomicznie działające układy kompensacyjne, w postaci wielowarstwowych piezoelementów zintegrowanych z tuleją giętą (pełniącą rolę wzmacniacza mechanicznego), zostały umieszczone pomiędzy nakrętką śruby i suportem (rys. 15). Pozwala to na kompensację drgań zespołu napędu posuwu. Proponowane rozwiązanie wykorzystuje aktuatory piezoelektryczne zintegrowane z układem kompensacji poprzez wzdłużnie zginaną tuleję. Światłowodowe czujniki piezoelektryczne zastosowano do pomiaru drgań.

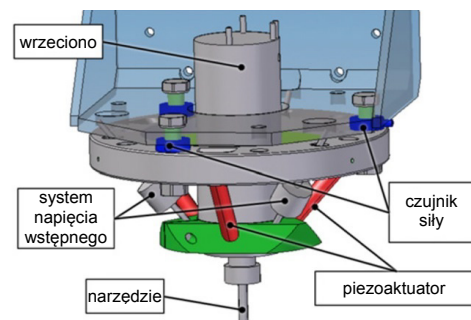
W celu aktywnej kompensacji statycznych i dynamicznych ugięć narzędzia oraz stabilizacji procesów frezowania została opracowana konstrukcja zespołu wrzecionowego ze sterowaniem adaptacyjnym położenia narzędzia [6]. Wokół wrzeciona zamontowano trzy siłowniki piezoelektryczne w konwencjonalnej konfiguracji kinematyki równoległej (rys. 16). Pozwalają one na realizację ruchów wrzeciona dla trzech stopni swobody: translacyjnego w kierunku osi Z i dwóch rotacyjnych wokół osi X i Y. Wierzchołek narzędzia może być przemieszczany wewnątrz pryzmatycznej przestrzeni w zakresie $\pm 100 \mu\text{m}$. Każdy siłownik jest wyposażony w czujnik tensometryczny do indywidualnej regulacji położenia. W skład układu pomiarowego wchodzi również trzy czujniki siły między górnym pierścieniem montażowym a korpusem wrzeciennika. Przedstawione rozwiązanie umożliwia aktywną kompensację przemieszczeń i drgań głowicy frezarki.

Dla przedmiotów, które wymagają dużej dokładności w trakcie obróbki zostały opracowane aktywne uchwyty obróbkowe. Przykład na rys. 17 [5] przedstawia mechatroniczne rozwiązanie uchwytu do precyzyjnego centrowania koła zębatego, które po dokładnym kuciu wymaga jedynie obróbki otworu bazującego i szlifowania zębów. Ze względu na szczególnie mały naddatek obróbkowy, pozostawiony na zębach i konieczność dostosowania osi otworu bazującego do istniejących już zębów każdego koła, położenie tej osi musi być skorygowane po zamocowaniu koła w uchwycie. W związku z tym po jego zamocowaniu zęby są mierzone z użyciem systemu wizyjnego i na tej podstawie jest obliczany wektor korekcji. Aktywny uchwyt z wbudowanymi napędami piezoelektrycznymi umieszcza każde koło zębate w optymalnym położeniu przed obróbką jego otworu (rys. 17). W taki sposób otwór ten jest dokładnie wycentrowany na zębach w zakresie położenia uchwytu $\pm 100 \mu\text{m}$ w kierunku osi X i Y. Energia potrzebna do zasilania elementów wykonawczych, wzmacniaczy i mikrokontrolera jest przenoszona bezstykowo (indukcyjnie) do obracającego się uchwytu. Wymiana danych między uchwycem a komputerem sterującym procesem jest realizowana przez łącze bluetooth. Przy użyciu aktywnego uchwytu mogą być kompensowane błędy zamocowania z dokładnością do $1 \mu\text{m}$. Możliwe jest również kontrolowanie i przestawianie osi obrotu przedmiotu podczas obróbki [5].

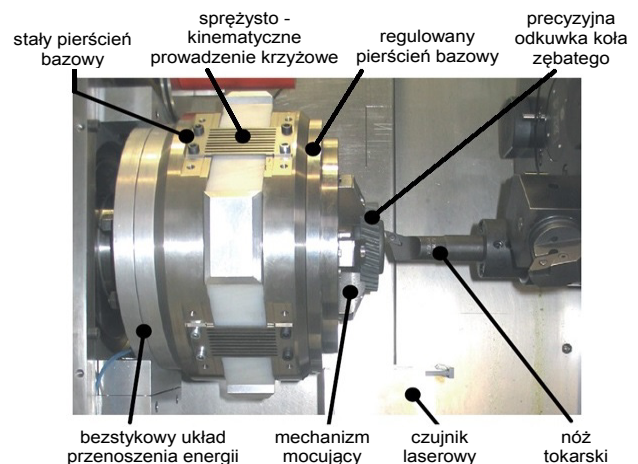
Bardzo ciekawe, całościowe podejście do problemu kompensacji, przedstawiono w pracy [12]. Oryginalność jego polega na łącznym uwzględnieniu błędów spowodowanych własnościami statycznymi, dynamicznymi i cieplnymi obrabiarki. W celu zapewnienia wysokiej precyzji, niezawodności i dynamicznej stabilności procesu obróbki szczególną uwagę przykładła się do poprawy tych własności przez zintegrowane sterowanie. Dotyczy to zarówno obrabiarki, jak i oprzyrządowania, w związku z koniecznością automatyzacji



Rys. 15. Zespół do kompensacji drgań wzdłużnych zespołu posuwu obrabiarki [16]



Rys. 16. Zespół wrzecionowy ze sterowaniem adaptacyjnym położenia narzędzia [6]

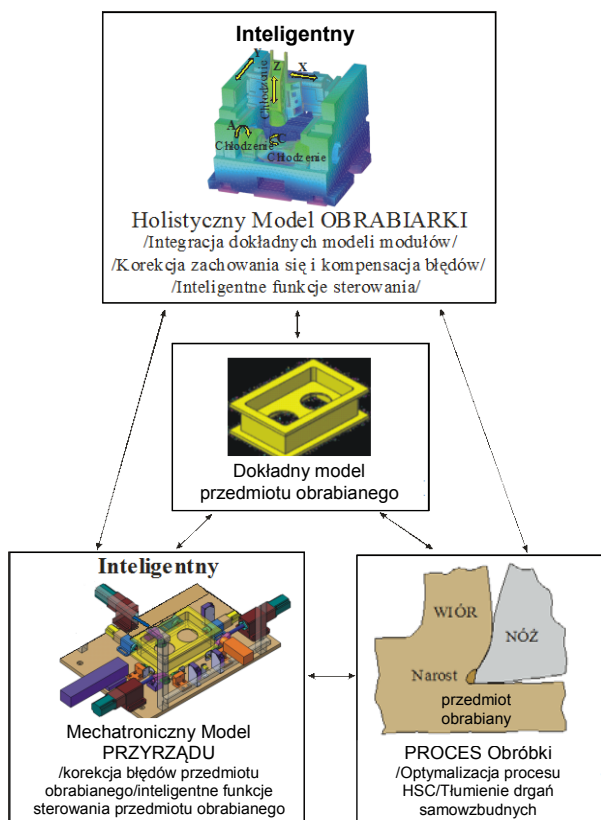


Rys. 17. Układ mechatroniczny do precyzyjnego pozycjonowania przedmiotu w uchwycie tokarki [5]

cji precyzyjnego pozycjonowania i mocowania przedmiotów obrabianych. W wielu przypadkach podstawą do skutecznego inteligentnego sterowania właściwościami obrabiarek jest dokładne prognozowanie ich stanów w czasie rzeczywistym, za pomocą wysoko zaawansowanych narzędzi programowych, przy czym stanom awarii można zapobiec, a błędy mogą być efektywnie kompensowane całościowo uwzględniając je w generowanej ścieżce narzędzia [12].

W celu realizacji efektywnej obróbki, oprócz minimalizacji i kompensacji błędów statycznych / geometrycznych oraz termicznych, ważne jest, aby zapobiec drganiom samowzbudnym przez ich prognozowanie z użyciem modelowania holistycznego [12]. Integracja wszystkich modeli (rys. 18) [14] stanowi wyzwanie dla poprawy modelowania drgań, w którym również przedmiot oraz jego właściwości termiczne i dynamiczne odgrywają ważną rolę.

W dotychczasowych rozwiązaniach stosowanych w obrabiarkach sterowanych numerycznie sterownik tworzył ścieżkę narzędzia i sterował pozycjonowaniem zespołów ruchowych. „W inteligentnej obrabiarkie komputer planuje proces i generuje ścieżkę w czasie rzeczywistym, korzystając z bazy danych i bazy wiedzy oraz informacji o procesie obróbki i jego wynikach” [12].



Rys. 18. Holistyczny model systemu wytwórczego [14]

Kierunki rozwoju inteligentnych funkcji obrabiarek

Mechatronika umożliwia największy postęp w dziedzinie rozwoju obrabiarek. Rozwój technologiczny w poszczególnych obszarach, takich jak podstawowe konstrukcje, mechanika, materiały, układy czujnik-aktuator, systemy przetwarzania danych, będzie charakteryzować przyszły rozwój „inteligentnych” obrabiarek [16]. W ciągu najbliższych lat obserwowane będzie rosnące użycie układów samo-optimizujących, podzespołów częściowo adaptacyjnych oraz coraz wydajniejszych układów sterowania wykorzystywanych do wspieranej modelami kompensacji błędów maszynowych i sterowania procesami [16]. Należy wspomnieć, że adaptronika jest innowacyjną i multi-dyscyplinarną technologią inżynierską, która gromadzi i łączy nową wiedzę w dziedzinie podstawowej mechatroniki konstrukcyjnej, generatywnej integroniki, inżynierii materiałowej, architektury aktuatorów i czujników, a także pomiarów, technologii automatycznego sterowania i inżynierii oprogramowania [8].

Możliwości modelowania holistycznego, symulacji numerycznej i wirtualizacji zachowań termicznych i dynamicznych obrabiarek w warunkach ich pracy oraz osiągalność czasu rzeczywistego są głównymi wyznacznikami rozwoju inteligentnych obrabiarek [12]. Rozwój inteligentnych funkcji wymaga modelowania cyfrowego właściwości obrabiarek i komponentów do generowania ścieżki narzędzia. Powinny być również rozwiązane problemy podejmowania

inteligentnych decyzji w oparciu o modele i monitorowanie w czasie rzeczywistym procesu oraz adaptacyjne sterowanie tym ostatnim. Badania powinny szczególnie skupić się na tworzeniu modeli generacji ścieżki narzędzia w połączeniu z rozwojem układów sterowania, otwartych na proces generowania tej ścieżki w czasie rzeczywistym dla obrabiarek i procesów o wysokiej dynamice.

LITERATURA

- Altintas Y., Verl A., Brecher C., Uriarte L., Pritschow G. „Machine tool feed drives”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 60 (2011): pp. 779–796.
- Angle Encoders without Integral Bearing http://www.heidenhain.de/de_EN/php/documentation-information/brochures/popup/media/media/file/view/file-0351/file.pdf (dostęp 17.07.2014).
- „Bezprzewodowy system QC20-W ballbar firmy Renishaw do diagnostyki stanu technicznego obrabiarek”. <http://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=pl&data=27053&btn=1> (dostęp 14.05.2016).
- Chrzanowski J. „Sonda narzędziowa z funkcją pomiaru zużycia ostrza”. *Mechanik*. R. 88, nr 12 (2015): s. 14–17, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.591.
- Denkena B., Götz, T. 2005, Rotierende Spannvorrichtung mit Aktorik zur Feinpositionierung, wt-online, 95/05: pp. 309–313.
- Denkena B., Gümmer O., Sellmeier V. „Static and Dynamic Stabilisation of a Milling Process by an Adaptronic Spindle System for Milling Machines”. *Proceedings of the Adaptronic Congress*. Berlin. (2009): pp. 93–98.
- Dornfeld D., Lee D.E. „Precision Manufacturing”. New York: Springer Science + Business Media, 2008.
- Gheorghie G.I. „What is Adaptronics?” *The Scientific Bulletin of Valahia University – Materials and Mechanics*. Vol. 10, No. 7 (2012): pp. 88–91. http://fsim.valahia.ro/sbmm.html/docs/2012/mechanics/6_Gheorghie_2012.pdf
- Großmann K., Müller J., Schween A. „Mikro-Achse als Zusatzaggregat für Großdrehmaschinen”. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. Vol. 96, No. 9 (2001): pp. 470–473.
- Honczarenko J. „Obrabiarki sterowane numerycznie”. Warszawa: WNT, 2008.
- Jemieliński K. „Tendencje rozwojowe w diagnostyce stanu narzędzia i procesu skrawania”. <http://www.zaoios.pw.edu.pl/kje-miel/docs/TendRozwDNIPS.pdf> (dostęp 24.07.2014).
- Jędrzejewski J. „Machine tool development from high level of holistic improvement to intelligence”. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 73, Iss. 2 (2015): pp. 55–64.
- Jędrzejewski J. „Znaczenie i rozwój inteligentnych obrabiarek”. *Stal Metale & Nowe Technologie*. Nr 5/6 (2015): s. 26–31.
- Jędrzejewski J., Kwaśny W., Kowal Z., Winiarski Z. „Development of the modelling and numerical simulation of the thermal properties of machine tools”. *Journal of Machine Engineering*. Vol. 14, No. 3 (2014): pp. 5–20.
- Moriwaki T. „Intelligent Machining”. *Proc. Workshop on Tool Condition Monitoring*. Vol. 1, Paris: Dornfeld D.A., Byrne G. eds. (1992).
- Neugebauer R., Denkena B., Wegener K. „Mechatronic Systems for Machine Tools”. *Annals of the CIRP*. Vol. 56, No. 2 (2007): pp. 657–686.
- „Nordmann Tool Monitoring”. <http://www.toolmonitoring.com/presentation.html> (dostęp 14.05.2016 r.).
- Pajor M., Zapłata J. „Zastosowanie metod sztucznej inteligencji do kompensacji odkształceń cieplnych śrub pociągowych obrabiarek CNC”. *Modelowanie Inżynierskie*. T. 20, nr 51 (2014): s. 70–76, http://www.kms.polsl.pl/mi/pelne_20/10_20_51.pdf.
- „Probing systems for CNC machine tools”. Renishaw. 2001-2014. [http://resources.renishaw.com/en/download/\(848fe042bee049169175eae78a939cb\)nt](http://resources.renishaw.com/en/download/(848fe042bee049169175eae78a939cb)nt) (dostęp 22.05.2016).
- „Rotary Encoders”. http://www.heidenhain.com/de_EN/php/documentation-information/brochures/popup/media/media/file/view/file-0035/file.pdf.
- Rößner W. „Werkzeugmaschinen/NC”. *Vorlesungsmanuskript*. Fakultät Maschinenbau. Hochschule Augsburg. <http://www.hs-augsburg.de/~roessner/downloads/vwm06.pdf> (dostęp 14.05.2016 r.).
- Taniguchi N. „Nanotechnology: integrated processing systems for ultra-precision and ultra-fine products”. New York: Oxford University Press, 1996.
- Teti R., Jemieliński K., O'Donnell G.O., Dornfeld D. „Advanced Monitoring of Machining Operations”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 59 (2010): pp. 717–739.
- Tönshoff H.K., Inasaki I. „Sensors in Manufacturing”. Weinheim – New York – Chichester – Brisbane – Singapore – Toronto: Wiley-VCH Verlag, 2001. ■