

Mirosław PAJOR¹
Krzysztof MARCHELEK¹

ASPEKTY TWORZENIA KONCEPCJI OBRABIARKI INTELIGENTNEJ

W artykule przedstawiono koncepcję budowy obrabiarki „inteligentnej” wyposażonej w odpowiednie systemy diagnostyczne do kontroli jej pracy. Zaprezentowano trendy światowe w zakresie rozwoju tej koncepcji oraz projekty badawcze realizowane w Instytucie Technologii Mechanicznej (ITM) i Centrum Mechatroniki (CM), funkcjonującymi na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Przedstawione projekty badawcze są pracami cząstkowymi rozwijającymi wybrane aspekty diagnostyki obrabiarki „inteligentnej”, takie jak kompensacja odkształceń cieplnych, błędów wolumetrycznych, widzenie maszynowe. Ponadto, wybrane projekty badawcze zajmują się rozwojem nowoczesnych technik modelowania i sterowania systemami mechatronicznymi, do których zaliczana jest obrabiarka „inteligentna”.

1. WSTĘP

Postęp w dziedzinie elektroniki, informatyki oraz technik i algorytmów sterowania umożliwił wyposażenie różnorodnych maszyn i układów mechanicznych w zaawansowane systemy ich nadzoru i sterowania. Urządzenia tego typu noszą nazwę układów mechatronicznych tj. układów, w procesie projektowania których dokonano synergicznego połączenia wiedzy z zakresu mechaniki, automatyki oraz informatyki procesowej. Do tej grupy maszyn i urządzeń, obok wielu współczesnych wyrobów, takich jak samochody, samoloty, roboty przemysłowe, maszyny budowlane itp., zaliczyć można przede wszystkim obrabiarki ze sterowaniem CNC [67],[98].

Nowoczesne obrabiarki CNC umożliwiają równoczesne sterowanie ruchami posuwowymi ich zespołów w wielu osiach. Dziś dość powszechnie spotykane jest sterowanie obróbką w pięciu niezależnych osiach i dodatkowo ruchem głównym roboczym, tj. prędkością obrotową wrzeciona obrabiarki [66]. Obrabiarki CNC wyposażone są w odpowiednie układy napędowe zintegrowane ze sterownikami ich ruchu oraz komputerowy system sterowania CNC realizujący złożone funkcje interpolacyjne i oferujący szerokie możliwości graficzne, przydatne w czasie programowania i symulacji planowanej obróbki oraz do prezentacji zadań obróbczych w czasie pracy obrabiarki.

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Technologii Mechanicznej, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, al. Piastów 19, 70-311 Szczecin

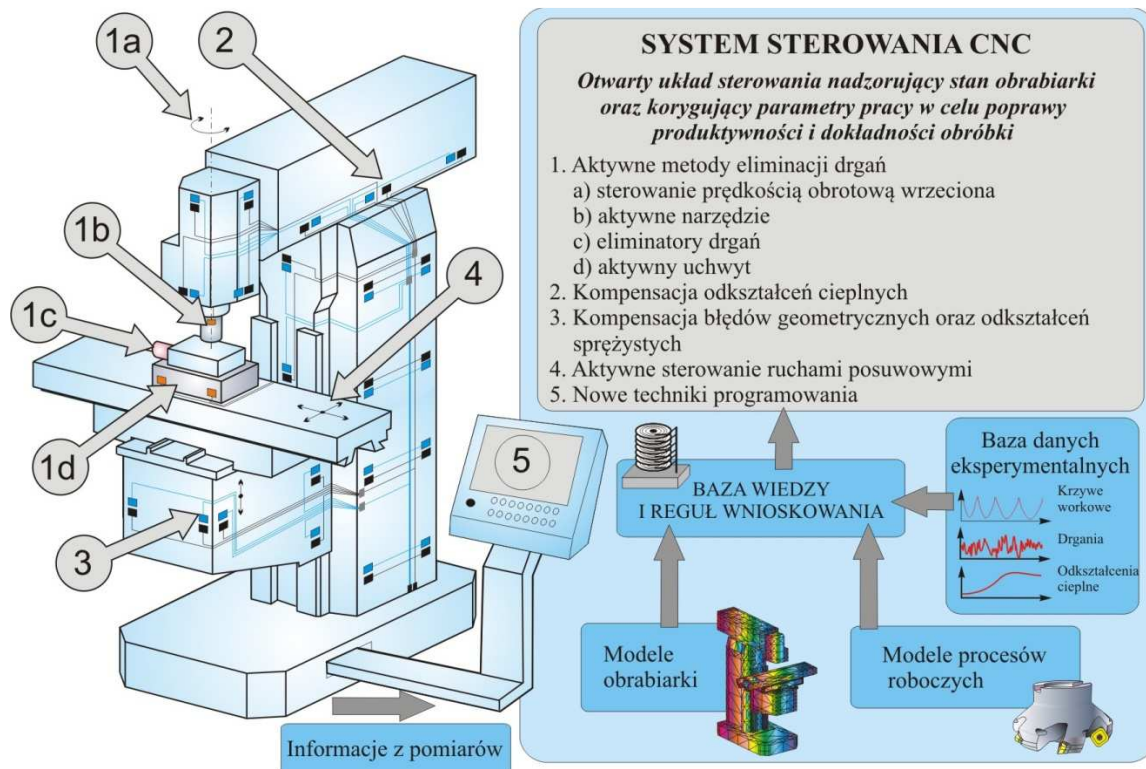
Istnieją przy tym tendencje zmierzające do dalszej rozbudowy systemu sterowania obrabiarek CNC o nowe funkcje pozwalające na nadzór i sterowanie stanów dynamicznych maszyny w trakcie realizacji obróbki [19],[36-37],[52],[61-62],[78],[82-83],[92]. Nadrzędnym celem tego typu prac jest zwiększenie produktywności oraz dokładności obrabiarki, jak również udoskonalenie procesu jej programowania, a ich punktem docelowym jest zbudowanie obrabiarki „inteligentnej” – samoczynnie reagującej na różnorodne bodźce (siłowe, drganiowe, cieplne, akustyczne) i podejmującej stosowne działania w celu opanowania niekorzystnych zjawisk dynamicznych oraz aktywnie współpracującej z operatorem obrabiarki [19],[50-51],[84].

Sterowanie obrabiarką i diagnozowanie jej stanów dynamicznych możliwe jest na wielu poziomach hierarchicznego układu nadzoru. Niezbędne podsystemy tego układu stanowią niejednokrotnie tematykę badań cząstkowych podejmowanych przez różne ośrodki badawcze krajowe i zagraniczne. Są to:

- otwarte systemy sterowania CNC [6],[29],[63],[65],[79],[101],[105];
- aktywne metody eliminacji drgań [53],[64],[78],[99];
- kompensacja odkształceń cieplnych obrabiarki [7-8],[17],[36],[38-40],[97];
- kompensacja błędów geometrycznych oraz odkształceń sprężystych [56],[80],[93-94];
- aktywne sterowanie ruchami posuwowymi [11],[48],[81],[91],[95];
- nowe techniki programowania obrabiarek [10],[54].

Schemat koncepcyjny obrabiarki inteligentnej jest przedstawiony na rysunku 1. Inteligentny układ sterowania CNC, wykorzystując informacje z bieżących pomiarów stanu obrabiarki, wyniki badań eksperymentalnych, modele procesów roboczych realizowanych przez obrabiarkę (np. modele procesu skrawania), modele obrabiarki (np. opisujące zjawiska cieplne, wolumetryczne błędy geometrii, drgania) oraz bazy wiedzy o procesach technologicznych i reguły wnioskowania, aktywnie steruje obrabiarką i kompensuje niekorzystne zjawiska dynamiczne z zastosowaniem aktywnych układów kompensacji, stanowiących podsystemy cząstkowe "inteligentnej obrabiarki".

W koncepcji obrabiarki „inteligentnej” wszystkie podsystemy cząstkowe winny być zintegrowane w jeden kompleksowy hierarchiczny system kontrolowany przez jednostkę centralną układu CNC [6]. Samo zagadnienie integracji może rodzić wiele problemów, ponieważ jednoczesne działanie poszczególnych podsystemów może prowadzić do niekorzystnych wzajemnych sprzężeń. System nadzoru obrabiarki „inteligentnej” winien być wyposażony w stosowne bazy danych oraz algorytmy obliczeniowe zawierające implementację modelu obrabiarki (drganiowego, termicznego, błędów wolumetrycznych) oraz modeli procesów roboczych stworzonych na podstawie zebranych danych eksperymentalnych z testów prowadzonych na obrabiarce. Elementy te winny stanowić źródło wiedzy systemu wnioskowania i wyboru strategii sterowania. Głównym wyznacznikiem tego typu systemu sterowania winna być jego otwartość, umożliwiająca odpowiednią adaptację jego algorytmów sterowania (cecha ta jest ciągle raczej niespotykana w komercyjnych układach sterowania CNC – stanowią one w większości całkowicie zamknięte systemy nieprzystosowane do ingerencji w ich algorytmy działania) [110-112].



Rys. 1. Schemat koncepcyjny obrabiarki "inteligentnej"

Fig. 1. Conceptual scheme of smart machine tool

W Instytucie Technologii Mechanicznej Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki oraz Instytucie Automatyki Przemysłowej Wydziału Elektrycznego Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie od wielu lat prowadzone są badania podsystemów częściowych omawianej koncepcji obrabiarki „inteligentnej”. Oba te zespoły badawcze zostały zintegrowane w ramach utworzonego Centrum Mechatroniki. W artykule zostaną przedstawione, na tle trendów światowych, główne kierunki badań prowadzonych w Centrum Mechatroniki realizujące koncepcję budowy obrabiarki "inteligentnej".

2. OTWARTY UKŁAD CNC STEROWANIA OBRABIARKI

Zdecydowana większość współcześnie wykorzystywanych systemów sterowania obrabiarek CNC jest całkowicie zamknięta dla użytkownika [110-112]. Przyczyn tego stanu rzeczy należy doszukiwać się przede wszystkim w przesłankach ekonomicznych, jakimi kierują się producenci systemów sterowania, tj. ochrona własnych rozwiązań i próby tworzenia zamkniętego rynku zbytu. Producenci systemów CNC często określają swoje rozwiązania jako systemy otwarte, jednakże otwartość ta sprowadza się li tylko do możliwości współpracy układu sterowania z napędami, układami pomiarowymi lub innymi komponentami automatyki dostarczanych przez innych producentów.

Idea otwartości architektury systemów sterowania CNC jest jednak silnie postulowana przez inżynierów projektantów i środowiska badawczo rozwojowe. Otwarta architektura układu sterowania, jakkolwiek byłaby rozumiana, jest zauważalnym trendem w technologii współczesnych systemów sterowania. W ostatnich latach wiele uwagi poświęca się badaniom nad tego typu systemami sterowania. W wielu krajach organizacje naukowo-badawcze opracowały standardy i propozycje architektury sprzętowo-programowej dla otwartych systemów sterowania min.: Stany Zjednoczone - SOSAS (Specification for an Open System Architecture Standard) [60], Europa - OSACA (Open System Architecture for Control with Automation Systems) [72], Japonia - OSEC (Open System Environment for Controller) [73] czy konsorcjum firm Chrysler, Ford i General Motors - OMAC (Open Modular Architecture Controls) [71]. Ponadto, wiele uczelni, jak np. University of British Columbia [28], University of Michigan [88] czy Shanghai Jiao Tong University [104], również prowadzi prace nad rozwojem systemów sterowania o otwartej architekturze.

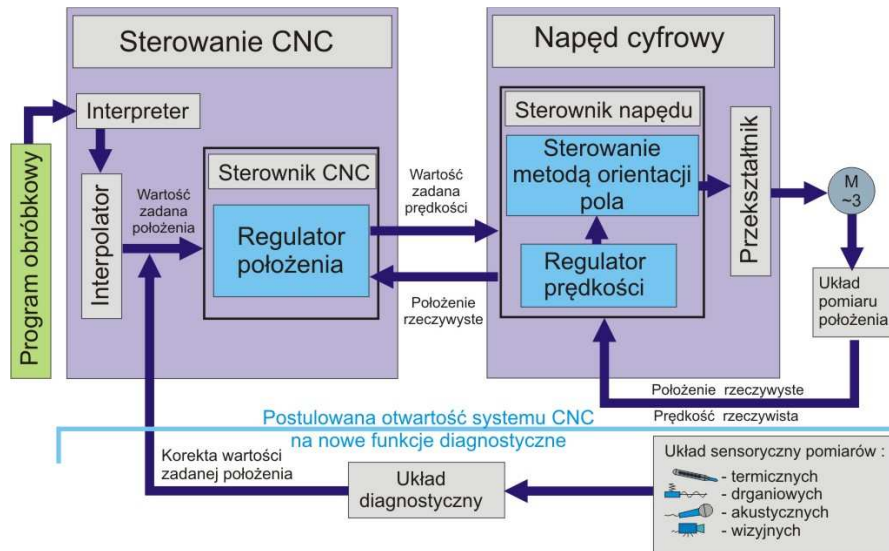
Otwartość architektury ma istotny wpływ na dalszy rozwój systemów sterowania obrabiarek CNC [79],[100], umożliwia bowiem integrację sprzętu, opracowanie przyjaznego dla użytkownika interfejsu konfiguracyjnego, jak również funkcji komunikacji w obrębie samej maszyny, jak i maszyny z otoczeniem produkcyjnym (w tym z innymi urządzeniami lub maszynami). Wszystkie wymienione wcześniej propozycje architektury zakładają współpracę w ramach jednego systemu sterowania urządzeń różnych producentów. Niestety wydaje się, że jedynie w systemach sterowania o architekturze zgodnej z założeniami OMAC postulat ten zaczyna znajdować swoje odzwierciedlenie w praktyce przemysłowej.

Pojęcie otwartości architektury systemu sterowania może być różnie rozumiane przez ich producentów. Komitet Techniczny ds. Systemów Otwartych organizacji IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) zaproponował następującą definicję: „system otwarty zapewnia możliwość uruchamiania odpowiednio przygotowanych aplikacji na rozmaitych platformach sprzętowych różnych producentów, umożliwiając jednocześnie wymianę informacji z istniejącymi w tych systemach aplikacjami, przy założeniu jednolitego sposobu komunikacji z użytkownikiem”. Celem oceny otwartości systemu sterowania wprowadza się następujące kryteria oceny:

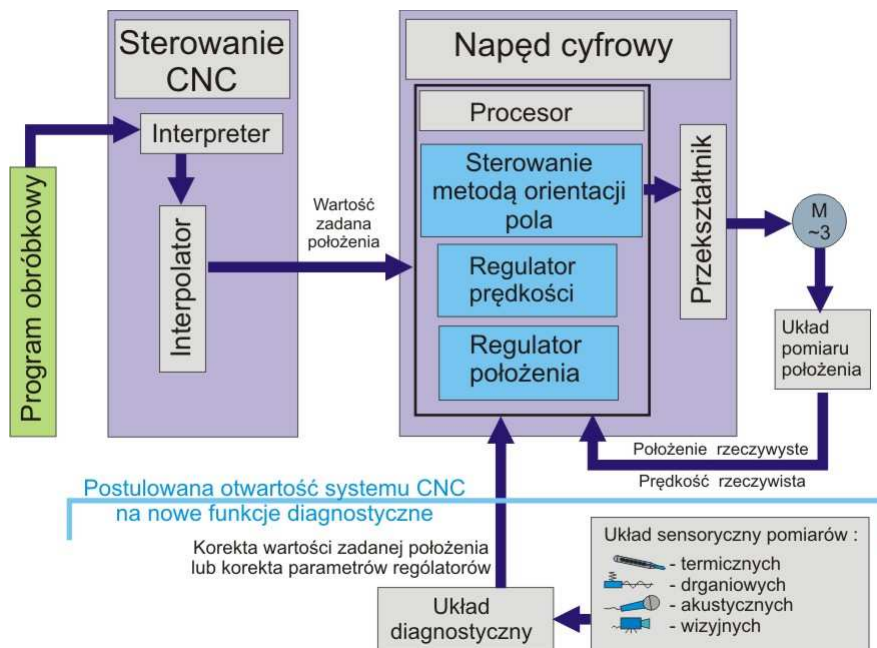
- przenośność – moduły systemu mogą być wykorzystywane na różnych platformach sprzętowych,
- rozszerzalność – w zależności od potrzeb system może się składać ze zmiennej liczby modułów,
- współdziałanie – moduły systemu wymieniają dane w standardowy sposób z otoczeniem oraz komunikują się w identyczny sposób pomiędzy sobą,
- skalowalność – zależnie od wymogów sterowanego procesu możliwe jest dostosowanie systemu tak w warstwie programowej jak i sprzętowej.

Z punktu widzenia rozwoju nowych funkcji diagnostycznych obrabiarki "inteligentnej", szczególnie interesujący jest postulowany w powyższej definicji wymóg współdziałania modułów otwartego systemu sterowania w standardowy sposób z otoczeniem. Współdziałanie to należy rozumieć szeroko, nie tylko jako wymianę określonych informacji, ale również jako możliwość aktywnej ingerencji w realizowany przez system proces sterowania. We współczesnych systemach sterowania CNC można

wyróżnić dwa podstawowe moduły [47]: moduł sterowania CNC i moduł napędu cyfrowego.



Rys. 2. Schemat blokowy konwencjonalnego systemu sterowania CNC
Fig. 2. Block diagram of conventional CNC control system



Rys. 3. Schemat blokowy "inteligentnego" systemu sterowania CNC
Fig. 3. Block diagram of "intelligent" CNC control system

Istnieją różne rozwiązania funkcjonalności obu modułów. W najbardziej rozpowszechnionym, standardowym rozwiązaniu (rys. 2) moduł sterowania CNC realizuje funkcję interpretera, interpolatora oraz regulatora położenia. Moduł sterowania CNC

przekazuje wówczas do modułu napędu cyfrowego wartości zadane prędkości. Na ich podstawie moduł napędu cyfrowego, realizujący funkcję regulatora prędkości oraz sterowania orientacją pola w silniku napędowym, steruje układem napędowym obrabiarki. W rozwiązaniu traktowanym jako "inteligentne", moduł sterowania CNC realizuje jedynie funkcje interpretera i interpolatora (rys. 3) przekazując do modułu napędu cyfrowego wartości zadane położenia. Moduł napędu cyfrowego realizuje wówczas funkcję regulatora położenia, regulatora prędkości oraz sterowania orientacją pola w silniku napędowym. W obu prezentowanych rozwiązaniach dostępne handlowe systemy CNC nie posiadają postulowanych funkcji współpracy z dowolnymi zewnętrznymi układami diagnostycznymi.

W Centrum Mechatroniki podjęto prace nad budową otwartego systemu sterowania CNC o nazwie *OCEAN* (Open modular Control system for lineAr motion driver) [25]. W efekcie tych prac zbudowany został otwarty system sterowania CNC na bazie komponentów firmy B&R. Na rys. 4 przedstawiono fotografię układu sterowania systemu *OCEAN*, który uzyskał złoty medal MTP w Poznaniu w roku 2009. Ten eksperymentalny system sterowania CNC posiada dużą moc obliczeniową, która umożliwia mu jednoczesne sterowanie ośmioma obrabiarkami o dziewięciu osiach CNC.



Rys. 4. Otwarty układ sterowania CNC o nazwie *OCEAN*
Fig. 4. Open CNC control system *OCEAN*

System *OCEAN* bazuje na architekturze zdefiniowanej przez OMAC. Dzięki temu możliwa jest implementacja zaawansowanych funkcji diagnostycznych z poziomu deterministycznego wielozadaniowego systemu operacyjnego czasu rzeczywistego. System umożliwia podawanie co 400 mikrosekund addytywnej lub multiplikatywnej wartości korekty wartości zadanej pozycji dla ruchu w poszczególnych osiach, zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 2. Ponadto, co 2 milisekundy możliwe jest odczytywanie/zapisywanie wybranych parametrów serwonapędu, jak np.: wzmocnienia regulatorów pozycji/prędkości w poszczególnych osiach ruchu, co daje możliwości

korekcyjne zgodne ze schematem pokazanym na rys. 3 (ograniczeniem technologicznym jest tutaj możliwość deterministycznego przesłania czterech różnych parametrów).

Ta ostatnia cecha systemu *OCEAN* jest wykorzystywana w kolejnym projekcie badawczym realizowanym w Centrum Mechatroniki (CM) o kryptonimie *MARINE* (**M**ultiv**A**riable hybrid modula**R** mot**I**on co**N**troll**E**r). W projekcie tym prowadzi się badania nad zapewnienia otwartości systemu CNC na poziomie algorytmów sterowania silnikami napędowymi (rys. 3). Badania tego typu są szczególnie istotne w dobie szybkiego rozwoju bezpośrednich napędów liniowych i obrotowych, coraz częściej stosowanych w osiach posuwowych i osiach głównych obrabiarek CNC. Eksperymenty prowadzone są na zbudowanym w Centrum Mechatroniki specjalnym module prowadnic krzyżowych, z napędami bezpośrednimi w postaci układu silników liniowych, pokazanym na rys. 5.



Rys. 5. Układ prowadnic krzyżowych z silnikami liniowymi
Fig. 5. Cross-rail system of linear guides with linear motors

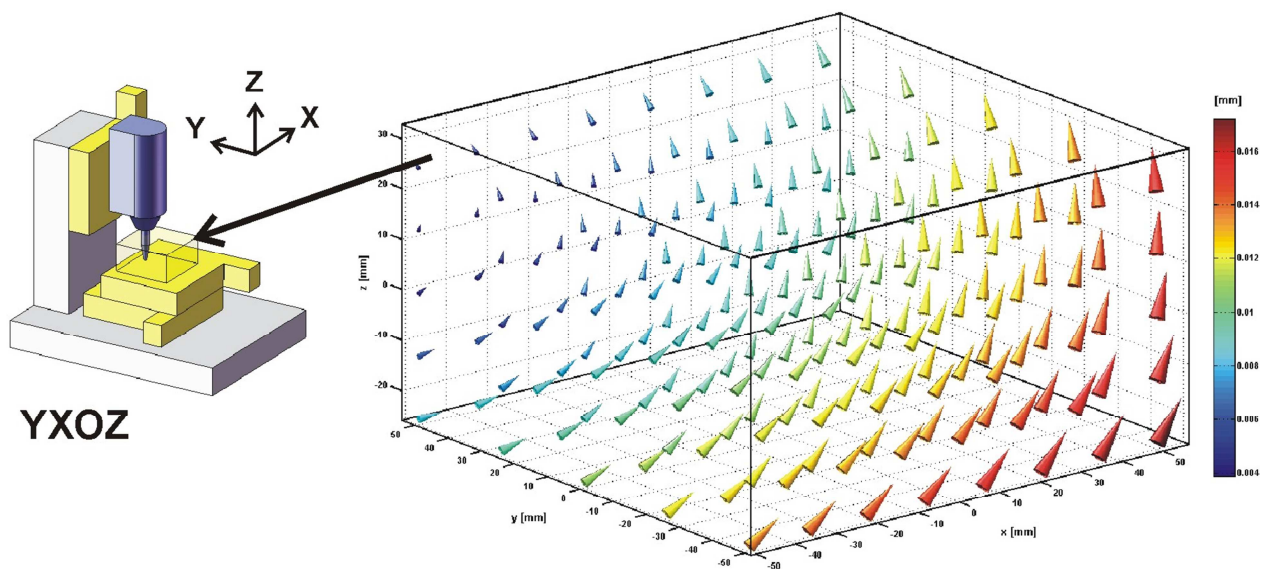
Stosowane tam silniki liniowe i momentowe [3-4],[30],[70] mimo niewątpliwych zalet wykazują wyższą niż napędy konwencjonalne (z tocznymi śrubami pociągowymi) wrażliwość na obciążenia zewnętrzne. Najlepszym rozwiązaniem przy sterowaniu takim napędem byłaby możliwość zmiany nastaw regulatorów lub wręcz zmiany algorytmów sterowania, zależnie od obciążeń działających na układ. Jest to cecha niespotykana we współczesnych systemach sterowania CNC i jest ona przedmiotem zaawansowanych badań w projekcie *MARINE*.

Omawiany otwarty układ sterowania *OCEAN/MARINE* jest punktem wyjściowym w koncepcji budowy prototypu obrabiarki „inteligentnej”. Oferowane przez ten system możliwości korekcji trajektorii ruchu oraz nastaw i algorytmów sterowania dają niespotykane możliwości budowy zaawansowanych układów diagnostycznych, które wyposażą obrabiarkę „inteligentną” w elektroniczne zmysły, umożliwiające wielopłaszczyznową kompensację niekorzystnych oddziaływań statycznych i dynamicznych występujących w trakcie jej pracy.

3. UKŁADY DIAGNOSTYCZNE OBRABIARKI INTELIGENTNEJ

Głównym celem stawianym przed konstruktorami nowoczesnych centrów obróbkowych CNC jest zapewnienie im dużej wydajności przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej dokładności obróbki. Cele te realizuje się w dwojaki sposób: po pierwsze wprowadzając nowoczesne, innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne, po drugie korygując własności konstrukcji mechanicznej poprzez procedury kompensacji elektronicznej zaimplementowane w układzie sterowania obrabiarki CNC.

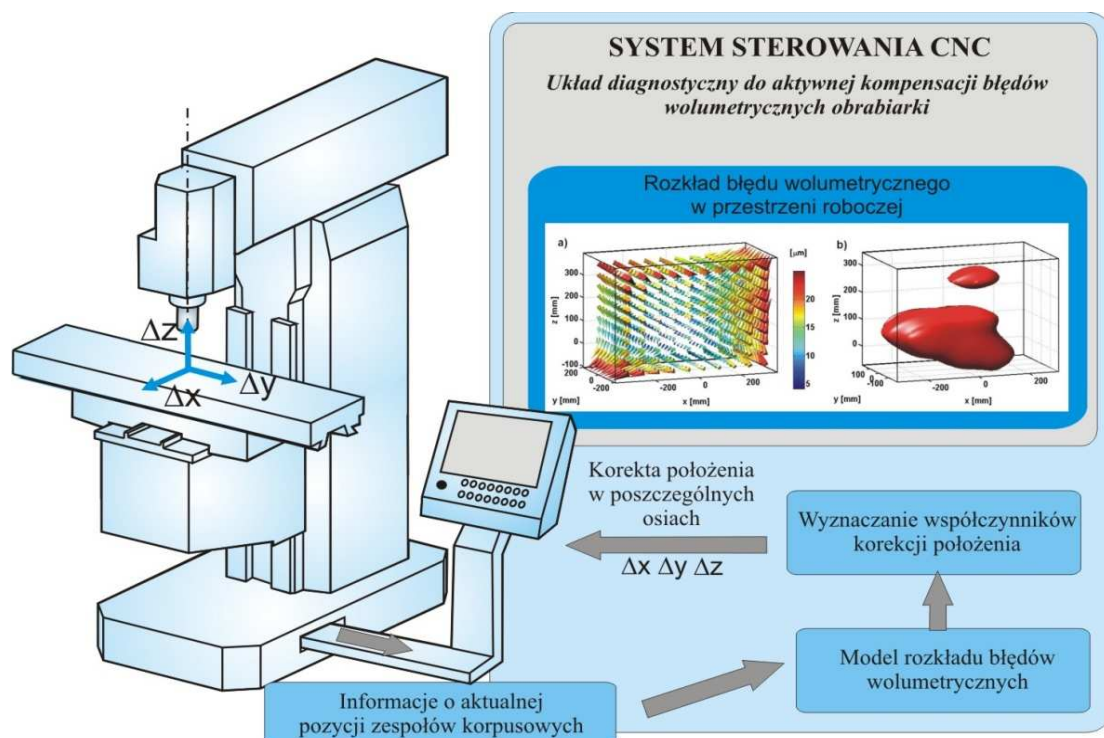
Dobrym przykładem pierwszego kierunku są już niemal powszechnie stosowane toczone układy prowadnicowe oraz toczone śruby pociągowe. Rozwiązania te między innymi zdecydowanie obniżają siły tarcia w układach prowadnicowych zwiększając tym samym możliwości dokładniejszego pozycjonowania elementów korpusowych obrabiarki. Innym przykładem jest coraz wyraźniej widoczna tendencja wprowadzania tzw. napędów bezpośrednich w postaci silników liniowych bądź momentowych w napędach posuwu oraz elektrowrzecion w napędach głównych obrabiarek [3-4],[30],[70]. Napędy bezpośrednie sterowane falownikami eliminują z układów napędowych komponenty mechaniczne, takie jak: przekładnie zębate, przekładnie pasowe, śruby pociągowe itp. Rozwiązania te pozwalają na zwiększenie szybkości i dynamiki ruchów głównych i posuwowych, eliminując przy tym wpływ na dynamikę i dokładność ruchu obrabiarki wymienionych komponentów mechanicznych. Synchronizacja ruchów oraz dokładne pozycjonowanie odbywa się wówczas wyłącznie na drodze elektronicznej poprzez układ sterowania CNC obrabiarki. Ponadto trwają prace nad wprowadzeniem w obrabiarkach prowadnic oraz łożysk magnetycznych [24],[87], co umożliwi dalszą redukcję tarcia w układach prowadnicowych i wrzecionowych, a tym samym zwiększenie dokładności pozycjonowania.



Rys. 6. Przykładowy rozkład wolumetrycznego błędu geometrii obrabiarki
Fig. 6. Example of volumetric error of machine tool

Drugi kierunek działań skupia się nad rozwojem układów diagnostycznych współpracujących z układem sterowania obrabiarki. Jednym z problemów, jaki jest rozwiązywany tą metodą, jest kompensacja błędów geometrycznych obrabiarki. Układ konstrukcyjny obrabiarki jest bowiem wykonywany z ekonomicznie uzasadnioną dokładnością. Poszczególne elementy układu konstrukcyjnego posiadają pewne błędy obróbki, a ich montaż również obarczony jest błędami montażu w granicach przyjętych tolerancji. Błędy te mogą być kompensowane w układzie sterowania obrabiarką. Istotnym problemem jest efektywny pomiar błędów geometrycznych w całej przestrzeni roboczej, czyli pomiar tzw. błędu objętościowego (wolumetrycznego). W pracy [94] zaprezentowano syntetyczny przegląd najnowszych technik pomiaru błędów wolumetrycznych obrabiarek. Wiele ośrodków naukowych realizuje badania w zakresie kompensacji tych błędów [80],[93],[94]. Na rys. 6 pokazano przykładowy model rozkładu błędów wolumetrycznych w całej przestrzeni obróbkowej obrabiarki, budowanej w CM (projekt o kryptonimie *MIKROOBRÓBKA*).

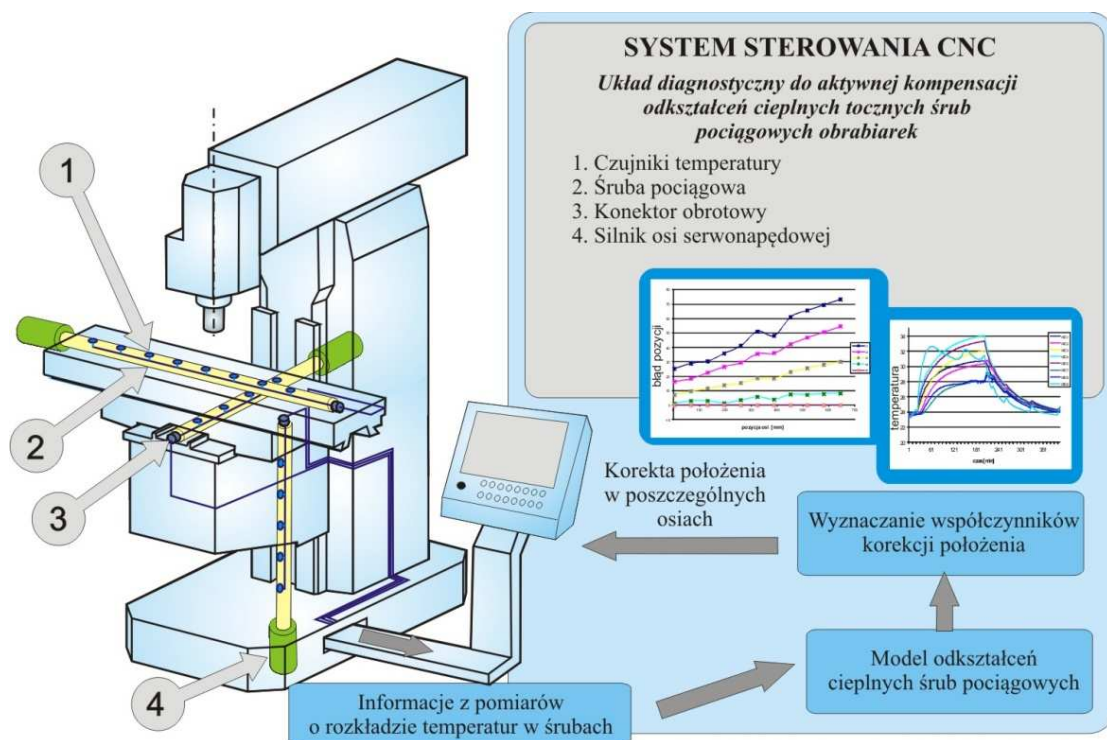
W ITM i CM prowadzone są badania w ramach projektu *WOLUMETRIK*, których celem jest opracowanie procedur opisu rozkładu błędów wolumetrycznych obrabiarki w całej przestrzeni roboczej i procedur kompensacji on-line tych błędów w układzie sterowania. Kompensacja ta odbywać się będzie poprzez wprowadzanie do otwartego układu sterowania CNC (rys. 2), z częstotliwością generowania trajektorii, korekt położenia zależnych od aktualnych pozycji elementów korpusowych obrabiarki. Na rys. 7 pokazano schemat ideowy projektowanego systemu diagnostycznego do kompensacji błędów wolumetrycznych obrabiarki CNC.



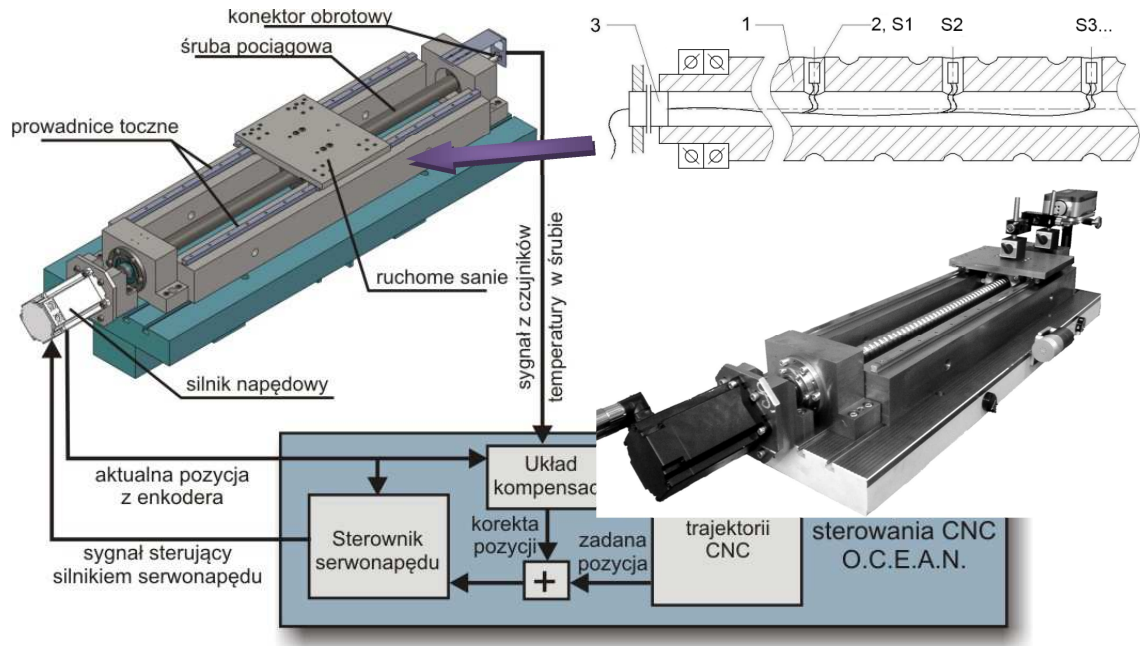
Rys. 7. Schemat ideowy układu diagnostycznego do kompensacji wolumetrycznych błędów geometrii obrabiarki
Fig. 7. Schematic diagram of a diagnostic system for the machine tool volumetric error compensation

Innym źródłem znacznych błędów obrabiarki są odkształcenia ciepłe układu konstrukcyjnego obrabiarki. Zmniejszenie wpływu odkształceń cieplnych zwykle realizuje się poprzez odpowiednie rozwiązania konstrukcyjne, takie jak: termo-symetryczna konstrukcja układu korpusowego [113], izolacja strefy obróbki, efektywne usuwanie gorących wiórów ze strefy obróbki, unikanie ich kontaktu z elementami korpusowymi obrabiarki czy efektywne metody chłodzenia.

Węzłami konstrukcyjnymi obrabiarek CNC szczególnie wrażliwymi na odkształcenia ciepłe są układy wrzecionowe i śruby pociągowe. W pracach [1],[38] przedstawiono metody modelowania i procedury kompensacji odkształceń cieplnych układów wrzecionowych obrabiarek CNC. W CM w ramach projektu o kryptonimie *TERMINATOR* prowadzone są badania nad budową układu diagnostycznego do kompensacji odkształceń cieplnych śrub pociągowych. Opracowano specjalną konstrukcję śruby pociągowej z czujnikami temperatury odpowiednio rozmieszczonymi na jej długości. Na rys. 8 przedstawiono schemat ideowy układu kompensacji odkształceń cieplnych śrub pociągowych. Układ ten realizuje ciągłe monitorowanie stanu termicznego śruby pociągowej i na podstawie modelu jej odkształceń cieplnych wyznacza wymaganą korektę dla generatora trajektorii. Korekcja toru ruchu obrabiarki niweluje skutki odkształceń cieplnych monitorowanej śruby pociągowej. Korekta ta jest podawana on-line do otwartego układu sterowania CNC (rys. 2). Opracowana metoda kompensacji odkształceń cieplnych śrub pociągowych została opatentowana. Na rys. 9 przedstawiono specjalne stanowisko badawcze, zbudowane w ramach projektu *TERMINATOR*, do testowania procedury kompensacji odkształceń cieplnych śruby pociągowej.

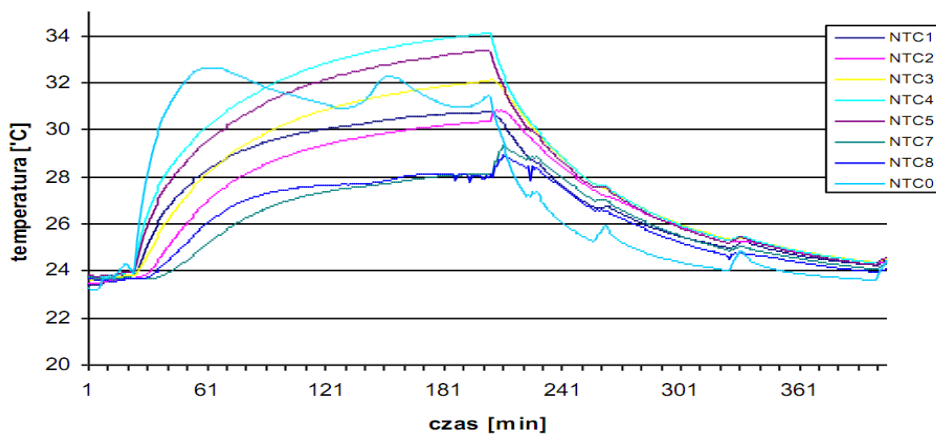


Rys. 8. Schemat ideowy systemu diagnostycznego do kompensacji odkształceń cieplnych śrub pociągowych obrabiarek
 Fig. 8. Schematic diagram of a diagnostic system for the compensation of thermal deformation of feed screws



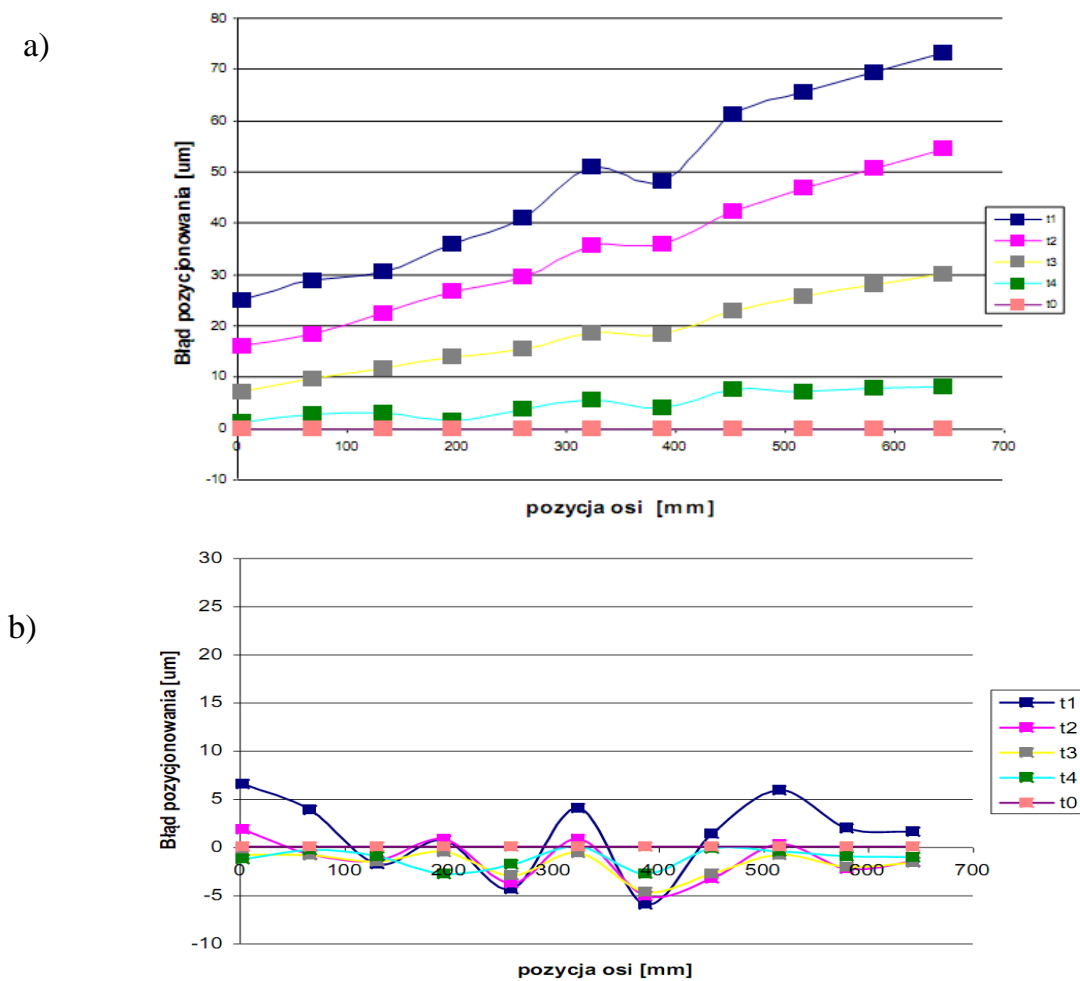
Rys. 9. Stanowisko do testowania procedur kompensacji odkształceń cieplnych śruby pociągowej: 1 - śruba pociągowa, 2 - czujniki temperatury (S1 - czujnik 1, S2 - czujnik 2), 3 - obrotowy konektor

Fig. 9. Equipment for testing procedures for compensation of thermal deformation of feed screw: 1 – the screw, 2 – temperature sensors (S1 – sensor 1, S2 – sensor), 3 – electric rotary connector



Rys. 10. Zarejestrowane temperatury z czujników NTC umieszczonych w śrubie
Fig. 10. The recorded temperature of NTC sensors placed in the screw

Na rys. 10 przedstawiono przykładowe przebiegi narastania i spadku temperatury czujników NTC rozmieszczonych w śrubie. Śruba nagrzewana była ruchem nakrętki na drodze 150 mm z prędkością $v=50$ mm/s, a następnie styła konwekcyjnie. Na rys. 11a przedstawiono zmierzone zależności pomiędzy błędem pozycjonowania, położeniem stolika i temperaturą śruby (przy czym $t_0 < t_4 < t_3 < t_2 < t_1$) przy wyłączonym układzie kompensacji, a na rys. 11b przy działającym układzie kompensacyjnym. Na prezentowanym stanowisku badane są procedury kompensacji wykorzystujące różne modele odkształceń cieplnych (m.in. modele konwencjonalne i neuronowe).



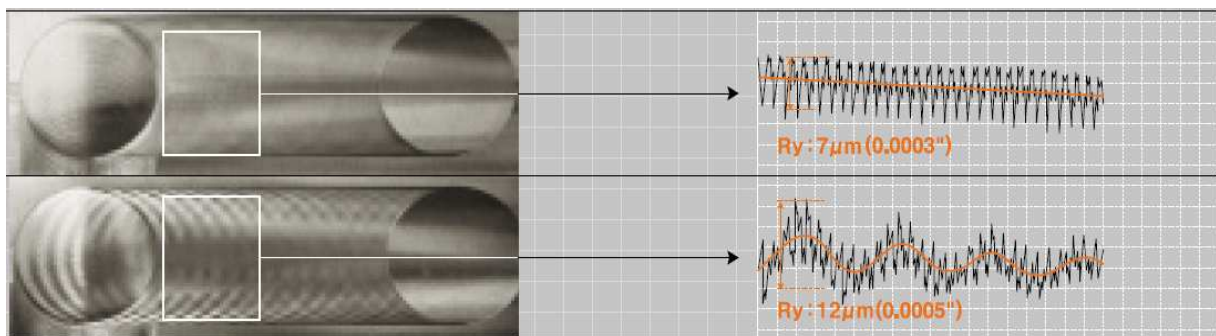
Rys. 11. Zależność pomiędzy błędem pozycjonowania, pozycją stolika a temperaturą śruby: a) z wyłączonym układem kompensacji, b) z działającym układem kompensacji

Fig. 11. The relationship between positioning error, the table position and the temperature of the screw: a) the system of compensation is off, b) the system of compensation is operating

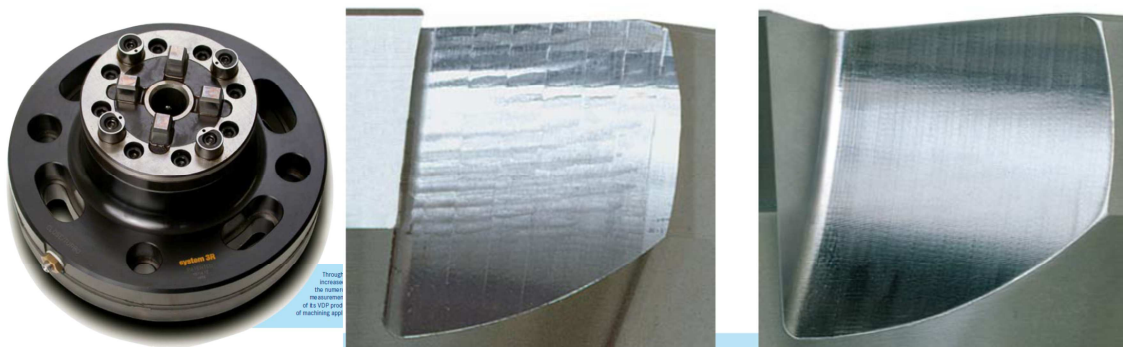
Kolejnym istotnym problemem w dynamicznym systemie O-PS (obrabiarka – proces skrawania) są drgania, ze szczególnym wyróżnieniem drgań samowzбудnych. Wystąpienie drgań samowzбудnych w trakcie obróbki drastycznie pogarsza jakość obróbki oraz obniża jej wydajność ze względu na konieczność zmniejszenia parametrów obróbkowych. Odpowiednio zaprojektowana konstrukcja układu nośnego obrabiarki ogranicza możliwości utraty stabilności podczas skrawania, jednak nie daje całkowitej gwarancji wyeliminowania tego szkodliwego zjawiska. Najczęściej przyczyną drgań samowzбудnych, mimo wysokiej stabilności samej obrabiarki, są tzw. słabe ogniwa w systemie O-PS, którymi zwykle są mało sztywne, smukłe narzędzia obróbkowe i przedmioty obrabiane o dużej podatności.

W literaturze światowej spotka się wiele publikacji na temat przeciwdziałania drganiom samowzбудnym [2],[12],[20],[35],[42],[49],[75-77],[96],[103]. Można dokonać pewnej klasyfikacji proponowanych metod eliminacji drgań samowzбудnych na: metody bazujące na doborze odpowiednich parametrów skrawania (najczęściej prędkości obrotowej

wrzucona) oraz metody polegające na dołączaniu układów dodatkowych w formie eliminatorów drgań. W pierwszym przypadku algorytm odpowiedniej strategii prędkości obrotowej może być bezpośrednio zaimplementowany w układzie sterowania CNC. Jest to jednak stosunkowo trudne, bo wymaga znajomości rozkładu tzw. krzywych workowych [74], który z kolei zależy od dynamicznych właściwości obrabiarki oraz realizowanego wariantu skrawania. Z uwagi na różnorodność możliwych wariantów skrawania zachodziłaby konieczność wyposażenia obrabiarki w stosowną bazę wiedzy o modelach opisujących te procesy oraz metodykę pomiaru charakterystyk dynamicznych obrabiarki wraz z zamontowanym przedmiotem obrabianym i narzędziem. Zautomatyzowanie takiej procedury wydaje się stosunkowo trudne, zatem zwykle realizuje się ją jako procedurę zewnętrzną, poza układem sterowania CNC. Dla określonego wariantu obróbki nastawia się parametry skrawania wyznaczone na drodze analizy zmierzonych charakterystyk dynamicznych obrabiarki i procesu skrawania. Stosowane są również techniki zmiennej prędkości obrotowej, które zakłócają proces rozwoju drgań samowzbudnych i podwyższają wibrostabilność systemu O-PS [2],[35],[42]. Jednak i w tym przypadku parametry regulatorów sterujących procesem zależne są od wariantu realizowanej obróbki. System aktywnej kontroli drgań komercyjnie wprowadziła firma MAZAK pod nazwą AVC (Active Vibration Control). Na rys. 12 pokazano wyniki działania systemu AVC [114].

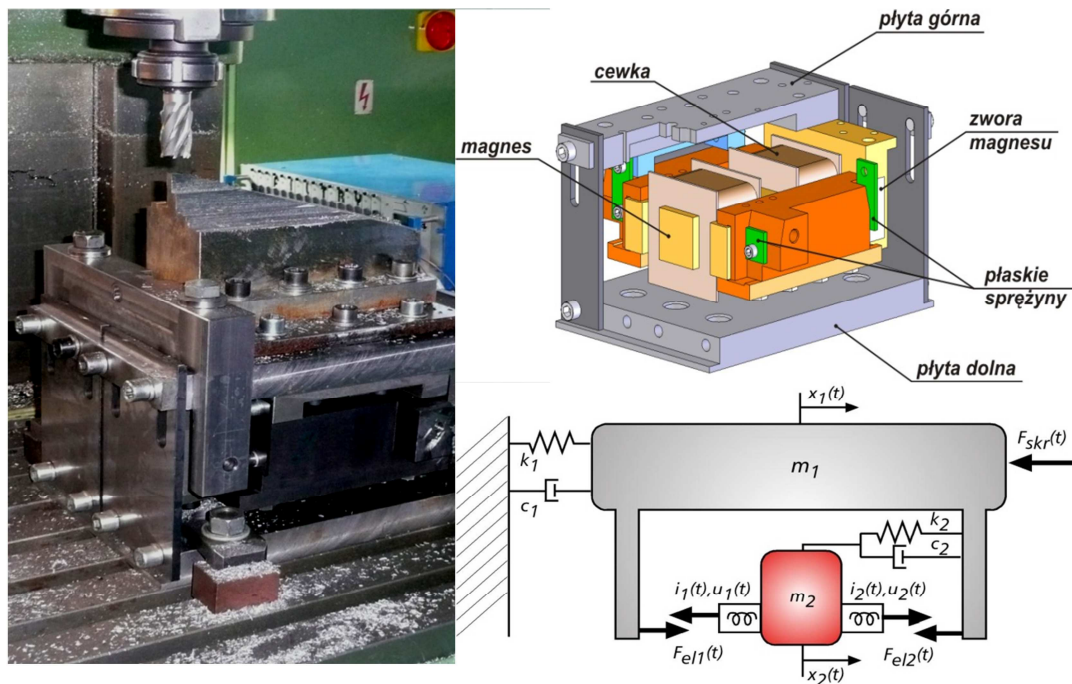


Rys. 12. Efekty działania systemu AVC firmy MAZAK [114]
 Fig. 12. Effectiveness of AVC system action from MAZAK [114]

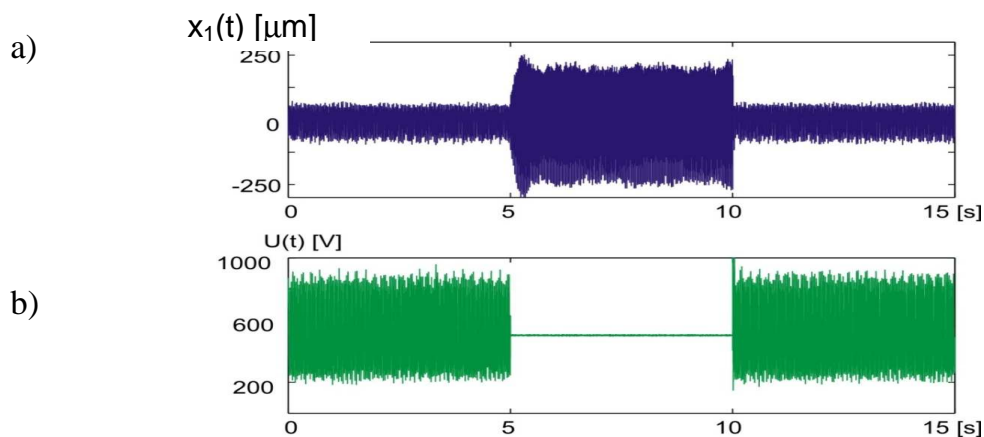


Rys. 13. Eliminatory drgań firmy System 3R oraz przykład skuteczności jego działania [116]
 Fig. 13. Vibration Eliminator System 3R's and example of the effectiveness of its action [116]

Dobre wyniki przeciwdziałania procesowi rozwoju drgań samowzbudnych uzyskuje się poprzez zastosowanie aktywnych eliminatorów drgań. Prowadzone są liczne badania nad rozwojem konstrukcji eliminatorów do aktywnej eliminacji drgań w procesie skrawania [20],[49],[75-77],[96], istnieją nawet gotowe rozwiązania handlowe tego typu urządzeń, jak np. pokazany na rys. 13 eliminator drgań firmy System 3R [116]. Do konstrukcji aktywnych eliminatorów drgań często stosowane są materiały zaliczane do grupy materiałów inteligentnych takie jak: materiały piezoelektryczne, ciecze elektro- i magneto-reologiczne czy materiały z pamięcią kształtu.



Rys. 14. Dołączany magneto-elektryczny eliminator drgań: fotografia, projekt konstrukcyjny, model fizyczny
Fig. 14. Appended magneto-electric vibration eliminator: photograph, design engineering and physical model

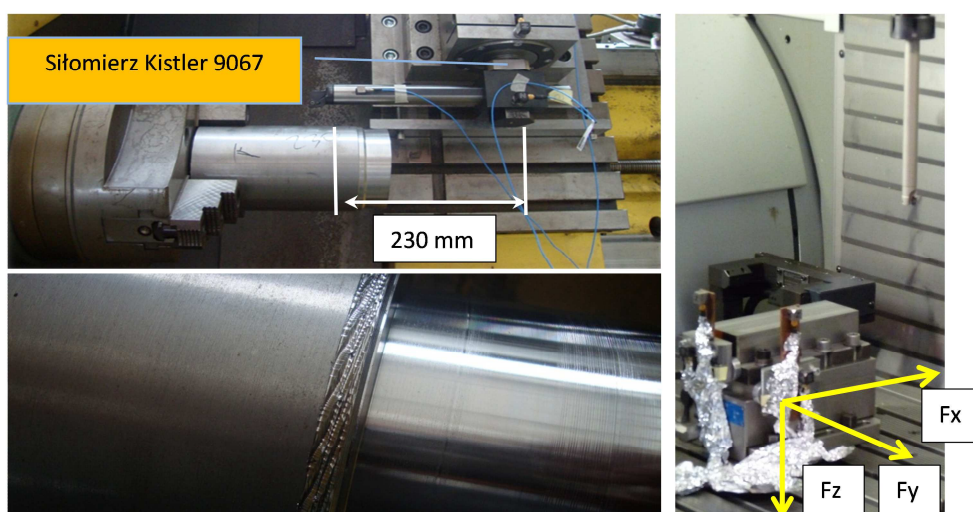


Rys. 15. Wyniki skuteczności działania piezoelektrycznego eliminatora drgań: a) drgania przedmiotu obrabianego $x_1(t)$,
b) napięcie sterujące $U(t)$ eliminatorem

Fig. 15. The results of the effectiveness tests of piezoelectric vibration absorber: a) vibration $x_1(t)$ of the workpiece,
b) control voltage $U(t)$ applied to the piezoelectric absorber

Projekty badawcze z tego zakresu również realizowane są w ITM i CM. Prowadzone są trzy kierunki badań nad urządzeniami do aktywnej eliminacji drgań w procesie skrawania. Pierwszy z nich, realizowany w ramach projektu o kryptonimie *ELIMINATOR*, obejmował badania nad układami aktywnych eliminatorów drgań, dołączanych do podatnego przedmiotu obrabianego, jako lokalnego układu przeciwdziałającego rozwojowi drgań samowzbudnych. Przebadano trzy rozwiązania takich urządzeń różniące się konstrukcją układu aktywnego wymuszenia lub tłumienia: w pierwszym rozwiązaniu zastosowano układ elektromagnetyczny [77], w drugim rozwiązaniu zastosowano tłumiki z cieczą magneto-reologiczną, a w trzecim przypadku zastosowano siłownik piezoelektryczny. Na rys. 14 pokazano fotografię, projekt konstrukcyjny i model stanowiska badawczego, które składało się ze specjalnie przygotowanego stolika do frezowania, o dużej podatności w jednym kierunku, oraz montowanego od spodu eliminatora drgań. Zdecydowanie najlepsze wyniki eliminacji drgań samowzbudnych uzyskano dla układu z siłownikiem piezoelektrycznym [76].

Na rys. 15 przedstawiono wyniki skuteczności działania piezoelektrycznego eliminatora drgań. Rys. 15a przedstawia drgania przedmiotu obrabianego $x_1(t)$ rejestrowane w trakcie obróbki (głębokość skrawania $a_p=2$ mm, posuw $f_z=0.7$ mm/ostrze, prędkość obrotowa $n=280$ obr/min) kolejno: z włączonym, wyłączonym i ponownie włączonym eliminatorem drgań. Na rys. 15b przedstawiono odpowiadające tym fazom wartości napięcia sterującego $U(t)$ układem piezoelektrycznym.



Rys. 16. Fotografie stanowisk: do badań podatnych narzędzi tokarskich i frezerskich z aktywnymi eliminatorami drgań oraz fotografia fragmentu powierzchni toczonej z wyłączonym eliminatorem

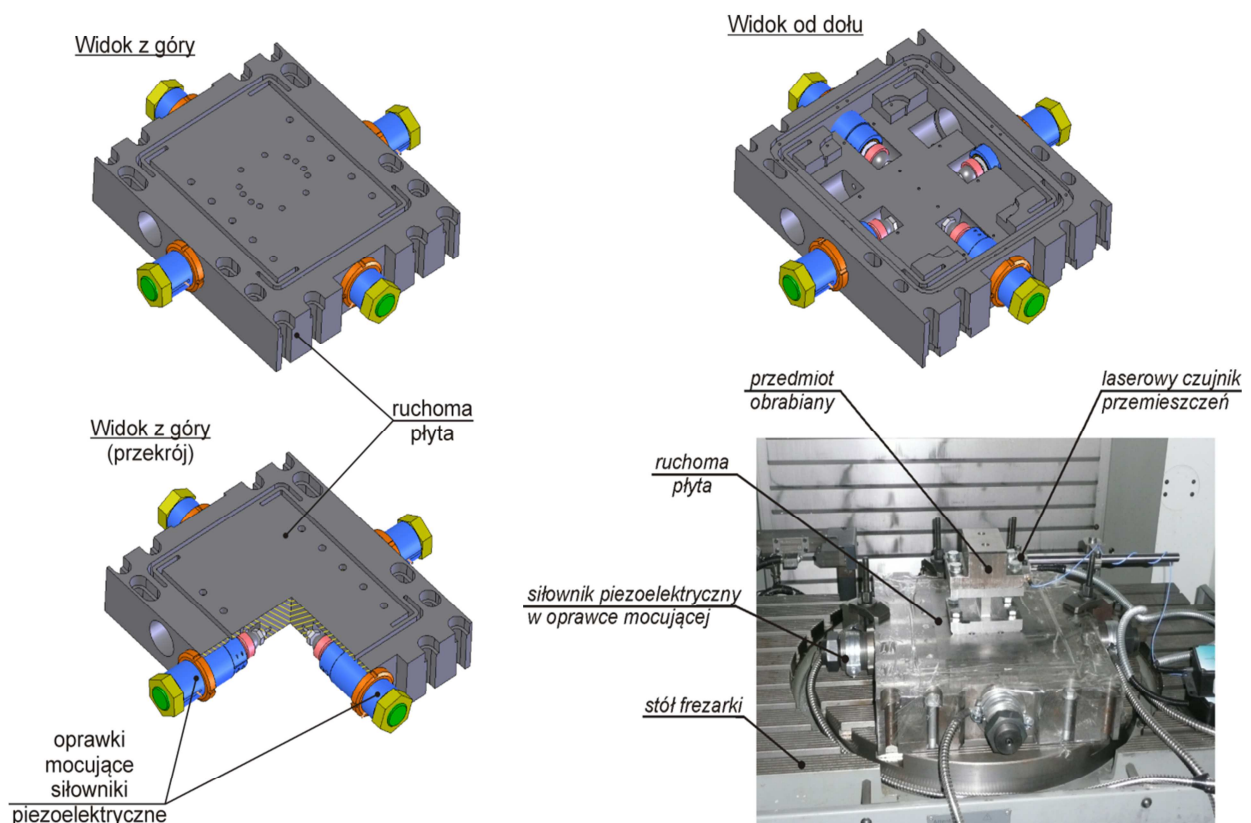
Fig. 16. Photographs of stands: for testing flexible turning and milling tools with active vibration eliminators and a part of the surface turned with eliminator controller switched off

Kolejnym realizowanym kierunkiem badań z zakresu aktywnej eliminacji drgań w procesie skrawania są prace nad aktywnymi układami tłumienia drgań umieszczanymi w narzędziach obróbkowych. W ITM i CM realizowany jest projekt o kryptonimie *INTELIĞENTNE NARZĘDZIE*, w ramach którego prowadzone są badania nad konstrukcją

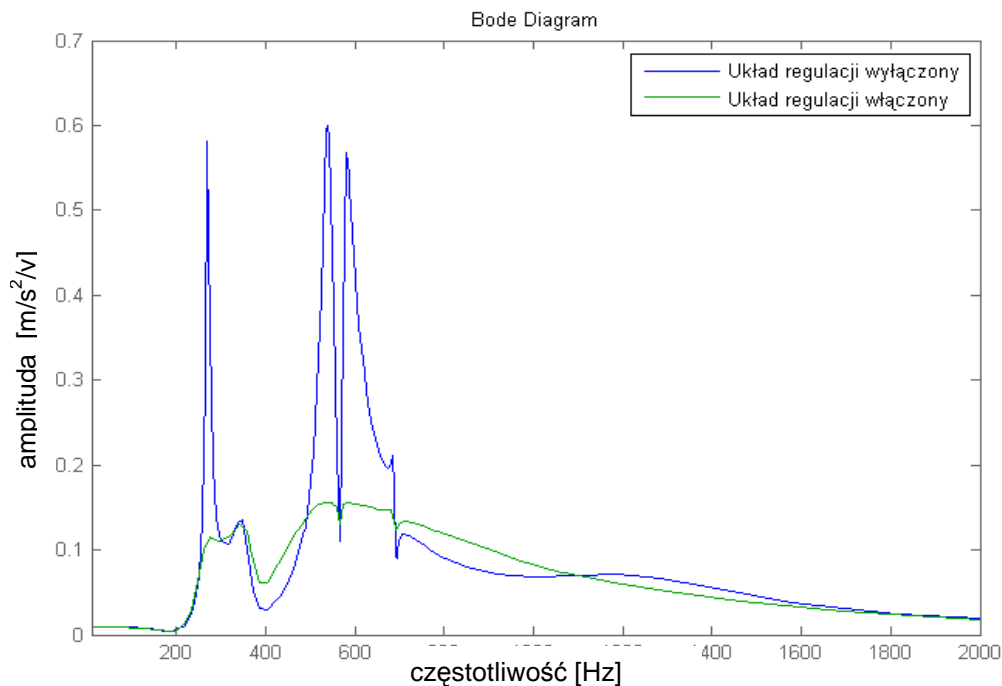
eliminatory – zarówno dla smukłych narzędzi tokarskich (np. wytaczaków o dużym wysięgu), jak i obrotowych narzędzi frezerskich. Na rys. 16 pokazano stanowisko badawcze skuteczności działania eliminatora drgań zamontowanego w wytaczaku o długości 230 mm oraz fragment powierzchni powstałej podczas obróbki bez eliminatora. Dużym problemem jest zasilanie narzędzi realizujących ruch obrotowy. W ramach projektu opracowano konstrukcje specjalnego bezprzewodowego systemu zasilania i transmisji danych do narzędzia wirującego.

Aktywne eliminatory drgań mogą być również stosowane po stronie przedmiotu obrabianego, jako aktywne uchwyty obróbkowe. Takie podejście ma miejsce w przypadku obróbki przedmiotów o dużej podatności. W ITM i CM realizowany jest projekt badawczy o kryptonimie *INTELIWENTNY UCHWYT*, w ramach którego opracowana została prototypowa konstrukcja układu do mocowania podatnych przedmiotów obrabianych, sterowanego systemem siłowników piezoelektrycznych.

Na rys. 17 pokazano projekt płyty mocującej przedmiot, sterowanej siłownikami piezoelektrycznymi oraz fotografię tej płyty zamocowanej na frezarce wraz z obrabianym podatnym przedmiotem. W ramach projektu *INTELIWENTNY UCHWYT* badane były różne algorytmy sterowania aktywnym uchwytem obróbkowym. Dla najlepszych strategii sterowania udało się osiągnąć znaczące podwyższenie granicznych parametrów skrawania.



Rys. 17. Projekt aktywnej płyty mocującej oraz fotografia stanowiska badawczego
 Fig. 17. Project of active-clamping system and the photograph of the test stand



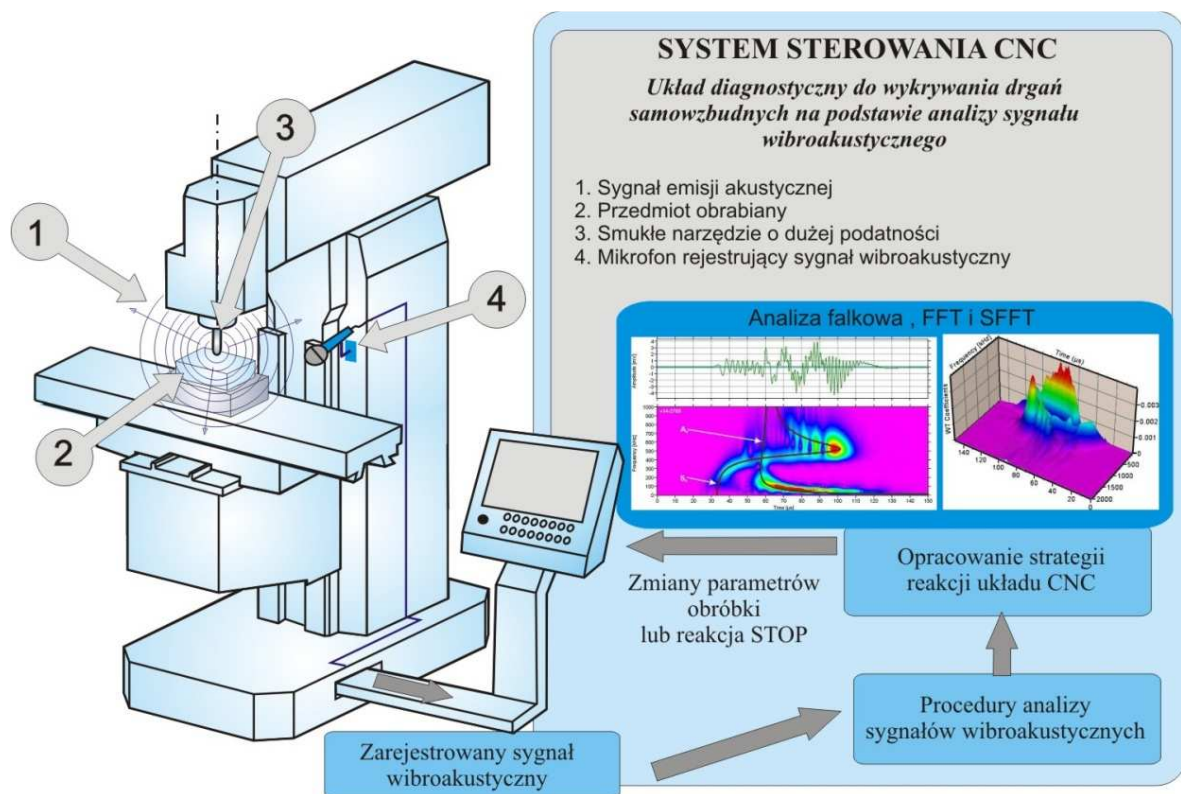
Rys. 18. Odpowiedź impulsowa aktywnej płyty mocującej
 Fig. 18. Impulse response of active fixing plate

Miarą skuteczności działania aktywnej płyty mocującej są przedstawione na rys. 18, zarejestrowane doświadczalnie, charakterystyki częstotliwościowe odpowiedzi impulsowej aktywnego uchwytu obróbkowego (płyty mocującej) wraz z zamocowanym przedmiotem obrabianym dla przypadków włączonego i wyłączzonego układu sterowania, bazującego na regulatorze LQG.

Cechą charakterystyczną wszystkich, konstruowanych w realizowanych projektach aktywnych układów eliminacji drgań, jest możliwość ich komunikacji z otwartym systemem sterowania CNC *OCEAN*. Jest to cecha niezmiernie ważna dla obrabiarki "inteligentnej", bowiem dalszy rozwój tych technologii i ich coraz większe upowszechnienie wymaga takiej komunikacji. System sterowania obrabiarki "inteligentnej" powinien być informowany, iż pracuje z aktywnym eliminatorem drgań, aktywnym narzędziem czy aktywnym uchwytem obróbkowym i kontrolować warunki ich pracy. Oddzielnym problemem badawczym jest jednoczesna praca kilku takich urządzeń. W CM podjęty został taki kierunek badań.

Inną problematyką nierozdzielnie związaną z zagadnieniami diagnostyki drgań w procesie obróbki jest problem wykrycia momentu wystąpienia efektu drgań samowzбудnych. W ITM i CM realizowane są trzy projekty związane z tą problematyką: projekt *WIBROAKUSTYKA*, projekt *IDENTYFIKATOR* oraz projekt *OBSERWATOR*. W projekcie *WIBROAKUSTYKA* jako sygnał diagnostyczny wykorzystywany jest sygnał akustyczny emitowany przez proces skrawania w czasie rozwijania się drgań samowzбудnych. Takie podejście jest szczególnie efektywne, gdy obróbka odbywa się z zastosowaniem smukłego narzędzia o dużej podatności i małej średnicy. Wówczas słabym

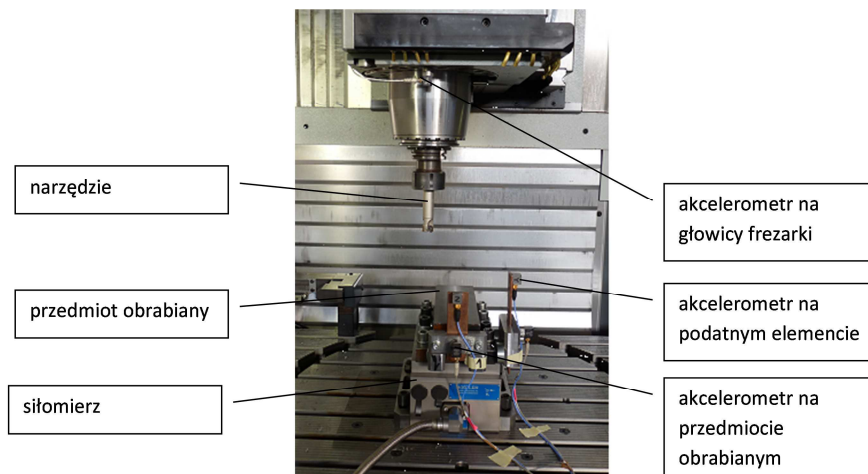
ogniwem systemu O-PS jest samo delikatne narzędzie, a ponieważ energia wzbudzonych drgań nie jest zbyt wielka, zatem obserwacja tego stanu za pomocą sensorów umieszczanych na korpusie obrabiarki daje słabe wyniki ze względu na duży poziom szumów tła. Schemat ideowy takiego systemu diagnostycznego, wykrywającego pojawienie się w układzie O-PS drgań samowzbudnych, pokazano na rys. 19. W ramach projektu opracowano procedury integracji systemu diagnostyki wibroakustycznej z otwartym systemem sterowania *OCEAN*.



Rys. 19. Schemat ideowy układu diagnostycznego do wykrywania drgań samowzbudnych z zastosowaniem sygnałów wibroakustycznych

Fig. 19. Schematic diagram of a diagnostic system for chatter vibration detection using vibro-acoustic signals

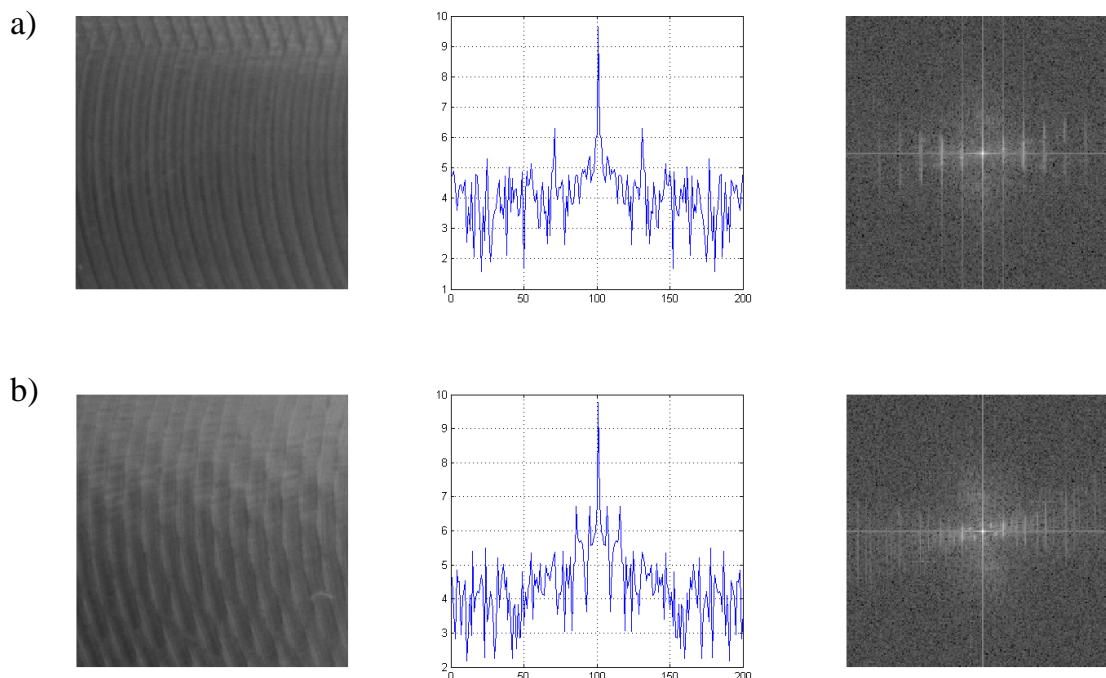
W projekcie *IDENTYFIKATOR* realizowanym w ITM i CM, do celów diagnostycznych wykorzystywany został sygnał z czujnika przyspieszeń zlokalizowanego możliwie blisko strefy skrawania. Opracowano specjalną procedurę identyfikacji odwrotnej, która umożliwiła predykcję sił skrawania na podstawie sygnału przyspieszeń. Jest to szczególnie przydatne podejście, ponieważ zastosowanie siłomierza (czyli wprowadzenie dodatkowego ogniwa w systemie O-PS) nie zawsze jest możliwe z uwagi na obniżenie sztywności układu OUPN (obrabiarka - uchwyt - przedmiot obrabiany - narzędzie). Zastosowanie jako sygnału diagnostycznego przyspieszeń jest szczególnie predysponowane do procesów obróbki zgrubnej, gdzie drgania samowzbudne osiągają dużą energię, która jest w stanie wprawiać elementy korpusowe obrabiarki w wysoki poziom wibracji.



Rys. 20. Fotografia stanowiska badawczego do testowania procedur diagnostycznych wykorzystujących sygnały przyspieszeń i metody identyfikacji odwrotnej

Fig. 20. Photograph of the research station for testing diagnostic procedures that use acceleration signals and methods of reverse identification

Na rys. 20 pokazano stanowisko badawcze na frezarce sterowanej numerycznie ze specjalnie przygotowanymi miejscami montażu czujników przyspieszeń. Wybrany zestaw akcelerometrów został zamontowany na specjalnym podatnym elemencie w celu zwielokrotnienia poziomu rejestrowanego sygnału. Pozostałe czujniki rozmieszczono na głowicy frezarki i na przedmiocie obrabianym w celu porównania ich możliwości diagnostycznych.



Rys. 21. Wyniki analizy widmowej obrazu powierzchni obrobionej frezowaniem: a) brak drgań samowzbudnych, b) wystąpiły drgania samowzbudne

Fig. 21. The results of spectral analysis of the image of surface finish milling: a) lack of chatter vibrations, b) chatter vibrations occur

Ostatnim z projektów tej serii jest projekt o kryptonimie *OBSERWATOR*. Jest to najnowszy projekt realizowany w ITM i CM, w którym jako sygnał diagnostyczny wybrano sygnał wizyjny. Diagnostyka prowadzona jest w systemie off-line. Kamera rejestruje obraz powierzchni obrobionej w procesie frezowania i na podstawie analizy sygnału wizyjnego diagnozuje pojawienie się drgań samowzбудnych w procesie skrawania. Na rys. 21 przedstawiono dwa obrazy powierzchni obrobionej oraz wynik analizy widmowej obrazu tych powierzchni. Zastosowanie procedur obróbki widmowej obrazu umożliwi wykrycie pojawienia się na powierzchni obrobionej specyficznej faktury powstałej w efekcie drgań samowzбудnych.

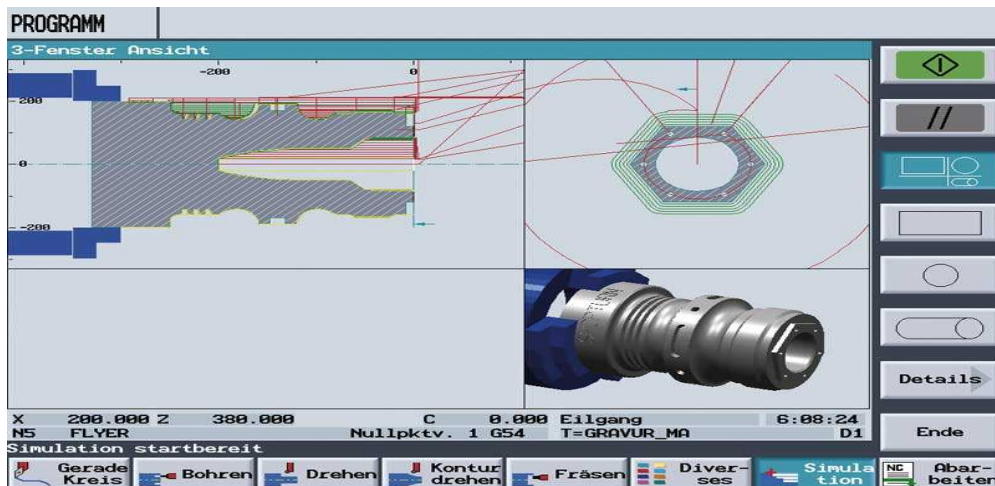
Prace nad rozwojem różnorodnych systemów diagnostycznych są nieustannie podejmowane przez różne ośrodki badawcze. Systemy diagnostyczne nadzorujące pracę obrabiarki można traktować jako swojego rodzaju zmysły obrabiarki (zmysł widzenia maszynowego, zmysł odczuwania temperatury czy zmysł odczuwania naprężeń obciążających korpus).

Opracowywane procedury wykrywania i kompensacji niekorzystnych zjawisk dynamicznych umożliwiają obrabiarce aktywne kontrolowanie swojego stanu, co przyjęto traktować jako pewien poziom inteligencji maszyny. Wszystkie te procedury muszą współpracować z systemem sterowania CNC, stąd tak ważne staje się zagadnienie otwartości tego systemu.

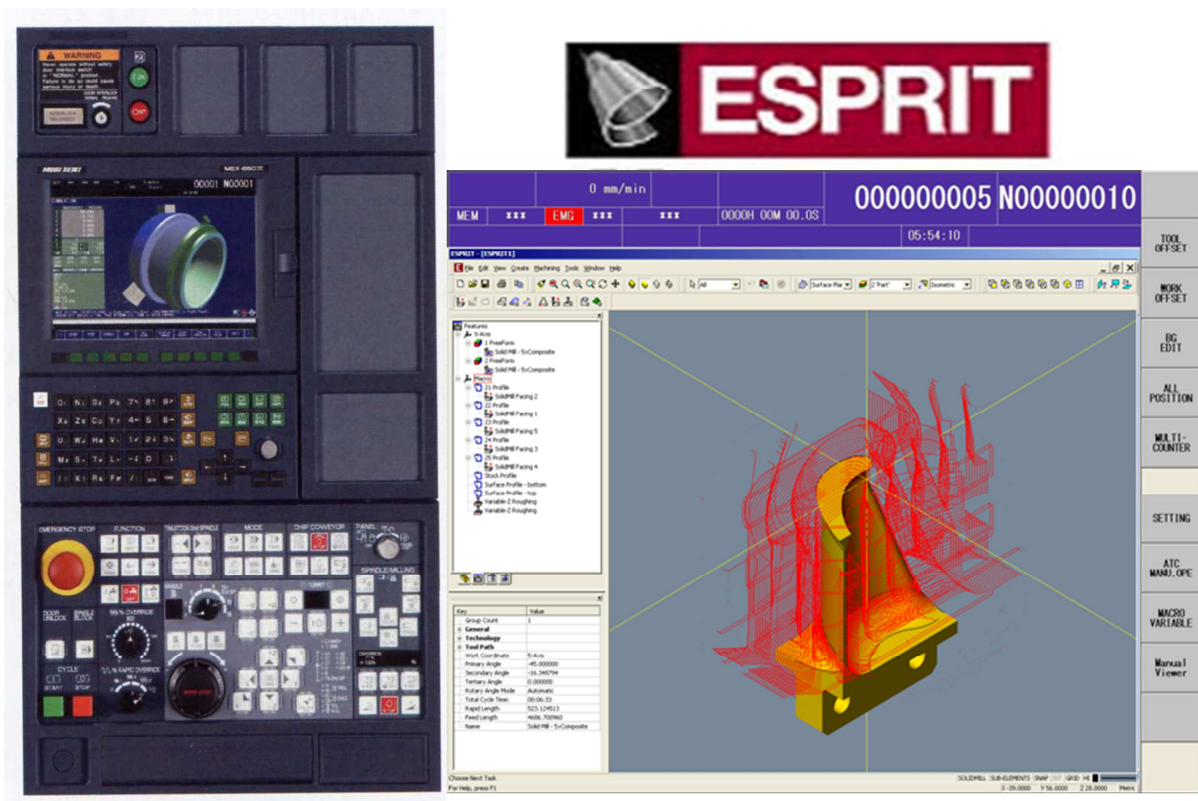
4. NOWE TECHNIKI STEROWANIA I PROGRAMOWANIA

Niezmiernie ważnym problemem w zagadnieniach inteligencji maszyn jest komunikacja maszyny z człowiekiem. Obrabiarki CNC są urządzeniami mechatronicznymi o dużym poziomie złożoności, zatem problem komunikacji z operatorem jest szczególnie ważny. Trwałą tendencją jest nieustanny wzrost możliwości obrabiarek CNC, a tym samym komplikacja procedur ich programowania. Należy pamiętać, że przy obrabiarkach zwykle nie pracują wysoko kwalifikowani inżynierowie, lecz operatorzy o wykształceniu zawodowym na poziomie technika. Sposób komunikacji obrabiarki z operatorem oraz procedury jej programowania winny być na tyle proste, że przeciętny, przeszkolony operator nie miał kłopotów z obsługą maszyny.

W zakresie języków programowania obrabiarek nadal powszechnie stosowane są tzw. G-kody (kody ISO), dalece odstające od możliwości współczesnych obiektowych języków programowania. Z uwagi na wzrost złożoności konstrukcyjnej i rozwój możliwości technologicznych obrabiarek CNC, taki stan rzeczy będzie ulegał zmianie. Obserwuje się już pewne działania wytyczające nowe kierunki rozwoju systemów programowania CNC. Przykładem takich działań może być system ShopTurn/ShopMill w sterownikach Sinumerik 840 D (i pokrewnych 840 D sl, 840 Di, 840 Di sl itp.) firmy Siemens [111]. Jest to system programowania dialogowego nie wymagający znajomości kodów ISO. Na rys. 22 przedstawiono przykładowy wygląd interfejsu operatora. System ten wyposażony jest w intuicyjny interfejs graficzny, rozbudowane funkcje wizualizacji 3D oraz dialogowy system programowania.



Rys. 22. System ShopTurn firmy Simens opcjonalnie dostępny w sterownikach Sinumerik 840 D [111]
 Fig. 22. Siemens ShopTurn system's optional in the CNC drivers Sinumerik 840 D [111]



Rys. 23. System MAPS IV firmy Mori Seiki zintegrowany z oprogramowaniem CAM ESPRIT [115]
 Fig. 23. Mori Seiki's MAPS IV system integrated with CAM software ESPRIT [115]

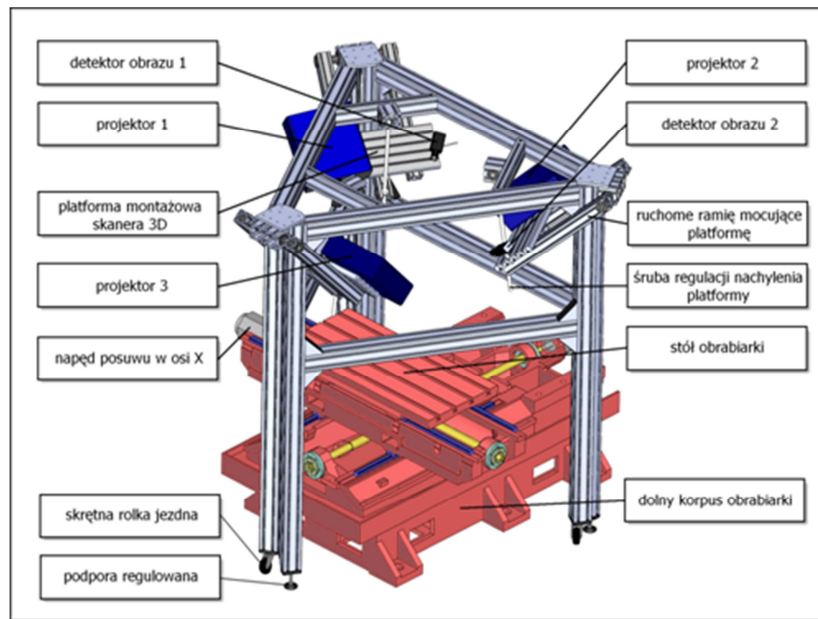
Innym przykładem tego kierunku rozwoju systemów CNC jest sterownik MAPSS IV firmy Mori Seiki [115]. Ten sterownik jest zintegrowany z systemem CAM komputerowego wspomaganie wytwarzania o nazwie ESPRIT. Na rys. 23 przedstawiono przykład interfejsu operatora, dzięki któremu operator obrabiarki ma na sterowniku CNC bezpośredni dostęp do rozbudowanego programu CAM, umożliwiające zaawansowane programowanie

procesu obróbki z poziomu środowiska graficznego. Rozwiązanie takie może budzić pewne wątpliwości z uwagi na zajmowanie czasu maszynowego procesem programowania obrabiarki, ale jest pewną próbą nowoczesnego programowania obrabiarki CNC przez operatora, z zastosowaniem wirtualnego środowiska graficznego. Podejście takie eliminuje konieczność żmudnego pisania kodu programu obróbkowego w abstrakcyjnym języku programowania, choć nie do końca jest efektywne z uwagi na złożoność obsługi systemu CAM.

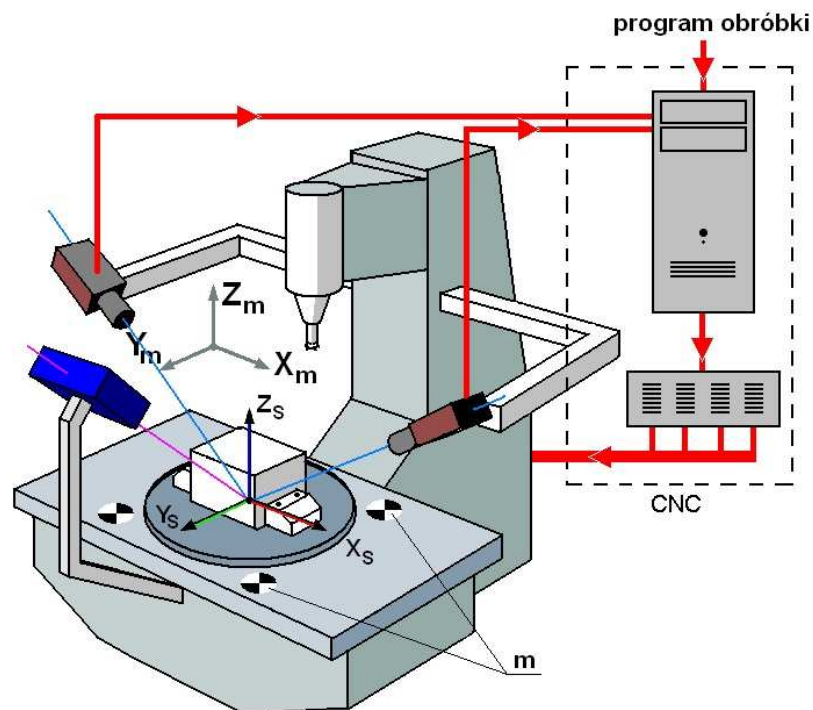
Podejmowane są również próby zastosowania komunikacji człowiek-obrabiarka bezpośrednio za pomocą mowy [9],[13],[16],[57],[86]. W pracy [57] przedstawiono wyniki badań, w których opracowano procedury sterowania mową dla systemu nadzorowania procesu szlifowania. W ramach projektu powstało oprogramowanie do analizy komend głosowych operatora oraz procedury generowania odpowiedzi i komend przez system CNC. Taki kierunek rozwoju systemów CNC wydaje się bardzo obiecujący i w przyszłości zdecydowanie ułatwi komunikację na styku człowiek-maszyna. Pierwsze rozwiązanie komercyjne z zastosowaniem komunikacji głosowej zaproponowała firma MAZAK w systemie MVA (Mazak Voice Adviser) [114].

W ITM i CM również podejmowane są prace nad rozwojem metod sterowania i programowania obrabiarek CNC. Aktualnie realizowane są dwa projekty *WIZJONER* i *VR PROGRAMATOR*. W ramach projektu *WIZJONER* prowadzone są badania nad wyposażeniem otwartego układu sterowania *OCEAN* w procedury pozycjonowania przedmiotów obrabianych na obrabiarce metodami wizyjnymi. Opracowano projekt i zbudowano specjalne stanowisko badawcze do skanowania geometrii i wyznaczania położenia przedmiotu obrabianego na stole obrabiarki z zastosowaniem procedur fotogrametrii [55]. Zastosowanie metod wizyjnych daje możliwość pełnej automatyzacji procesu ustalania bazy obróbkowej, bez konieczności realizacji żmudnych pomiarów sondą narzędziową (pomiaru sterowane ręcznie). Ponadto, dane z pomiarów trafiają do układu sterowania CNC i mogą być zastosowane do bieżącej aktualizacji danych systemu antykolizyjnego obrabiarki oraz do kontroli rozkładu naddatków obróbkowych. Opracowana koncepcja pozycjonowania przedmiotu obrabianego na obrabiarce CNC z zastosowaniem układu wizyjnego sprzężonego z układem sterowania obrabiarki została opatentowana. Na rys. 24 pokazano projekt stanowiska badawczego do skanowania geometrii i pozycjonowania przedmiotów obrabianych na obrabiarkach CNC, a na rys. 25 schemat ideowy projektowanego systemu wizyjnego obrabiarki.

W projekcie *VR PROGRAMATOR* (VR - Virtual Reality) podjęto pracę nad nowym podejściem do techniki programowania obrabiarek. Inspiracją były stosowane już w robotyce metody programowania robotów poprzez uczenie. W ramach projektu opracowano specjalny manipulator MPEKO (**M**anualny **P**zesuw **E**lementów **K**orpusowych **O**brabiarki) do ręcznego przemieszczania zespołów korpusowych obrabiarki, który jest wykorzystywany w procesie programowania obrabiarki poprzez uczenie jej poszczególnych ruchów. Ruchy zadawane przez operatora są zapamiętywane przez system sterowania CNC, a następnie, po doprecyzowaniu danych wymiarowych, są wykorzystywane do automatycznego generowania kodu obróbkowego. Programowanie może odbywać się bezpośrednio przy obrabiarce z użyciem układu MPEKO lub w specjalnie zaprojektowanym środowisku wirtualnym.



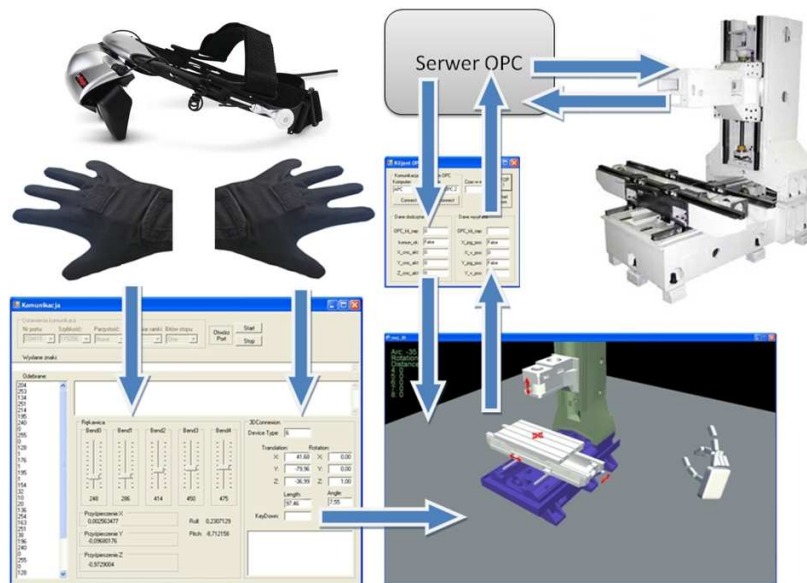
Rys. 24. Stanowisko badawcze do skanowania geometrii i położenia przedmiotu obrabianego na obrabiarce CNC
 Fig. 24. The research station for scanning the geometry and position of the workpiece on CNC machine tool



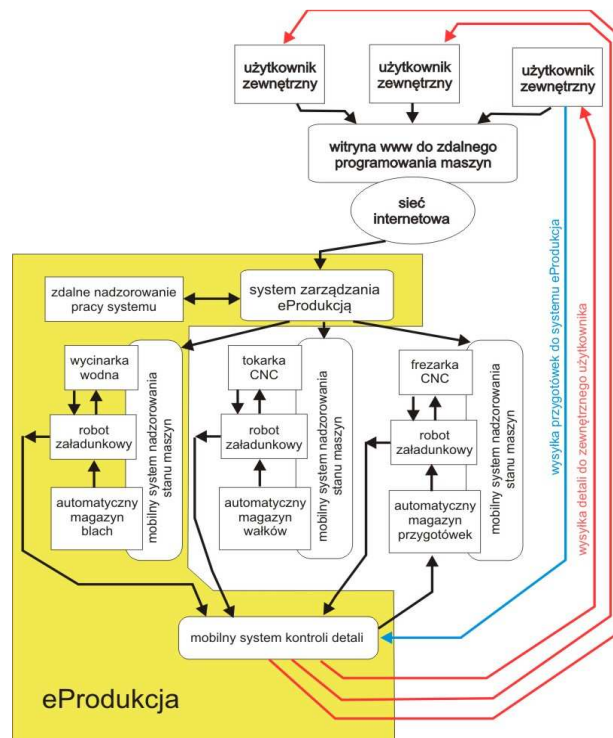
Rys. 25. Schemat ideowy systemu do skanowania geometrii i położenia przedmiotu obrabianego na obrabiarce CNC
 Fig. 25. Schematic diagram of the system for scanning the geometry and position of the workpiece on CNC machine

Na rys. 26 pokazano schemat funkcjonalny systemu do manualnego programowania w przestrzeni wirtualnej. Komunikacja operatora z wirtualną obrabiarką odbywa się z zastosowaniem specjalnych okularów i rękawic manipulacyjnych, za pomocą których

operator porusza zespołami obrabiarki w przestrzeni wirtualnej. Sygnały o przemieszczeniach zespołów mogą być przesyłane za pośrednictwem serwera OPC do systemu sterowania *OCEAN* rzeczywistej obrabiarki, która będzie realizować ruchy analogiczne jak model wirtualny.



Rys. 26. Schemat funkcjonalny systemu do manualnego programowania obrabiarek w środowisku VR
 Fig. 26. Functional diagram of the system for manual programming of machine tools in the VR environment



Rys. 27. Schemat ideowy systemu eProdukcja
 Fig. 27. Schematic diagram of eProdukcja system

W przyszłości planuje się połączenie systemu *WIZJONER* z *VR PROGRAMATOREM*, co pozwoli uzyskać zupełnie nową jakość w zakresie zdalnego programowania i obsługi obrabiarek.

W nowoczesnych systemach sterowania obrabiarek ważną rolę odgrywają możliwości komunikacji obrabiarki ze swoim otoczeniem, a w szczególności z systemem produkcyjnym, którego obrabiarka jest częścią składową [14],[18],[23],[44],[61],[68]. Rozwijane są metody zarządzania systemami produkcyjnymi o otwartej architekturze. W pracy [18] przedstawiono koncepcję systemu DNMM (Distributed Network Manufacturing Mode) bazującą na technologii Multi-Agent i umożliwiającą pracę obrabiarek w sieciowo zarządzanym rozproszonym systemie produkcyjnym. Koncepcja sieciowo zorientowanego systemu produkcyjnego, lecz o innym podejściu, realizowana jest również w ITM i CM w ramach projektu o kryptonimie ePRODUKCJA. Na rys. 27 pokazano schemat ideowy projektowanego internetowego systemu produkcyjnego. W projekcie opracowywana jest koncepcja systemu produkcyjnego (na bazie obrabiarki CNC do wycinania strugą wodną – na rys. 27 wewnątrz żółtej ramki) zdalnie programowanego przez internet, bezpośrednio przez zamawiającego usługę wycinania strugą wodną.

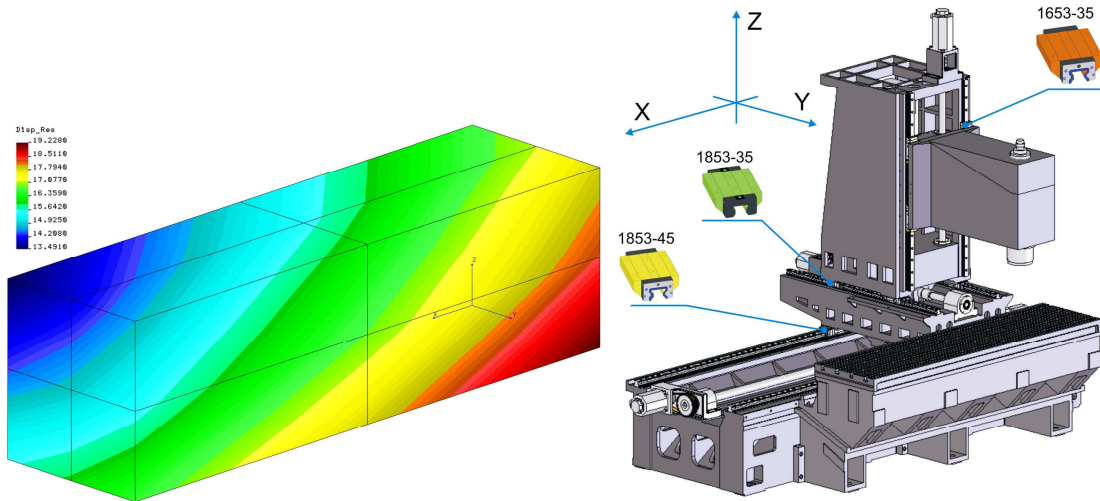
5. ROZWÓJ METOD MODELOWANIA OBRABIAREK

Wiele procedur diagnostycznych nadzoruje procesy zachodzące w kontrolowanym obiekcie bazując na możliwości predykcji zachowania się obiektu na podstawie jego modelu. Zatem rozwijając koncepcję obrabiarki inteligentnej nie można pomijać kwestii doskonalenia modeli obliczeniowych symulujących zjawiska dynamiczne zachodzące w systemie O-PS.

Wiele ośrodków krajowych i zagranicznych pracuje nad doskonaleniem technik modelowania obrabiarek. Prace te skupiają się na modelowaniu zjawisk cieplnych [7-8], [17],[36],[38-40],[97], modelowaniu dynamiki układu MDS (masowo-dysypacyjno-sprężystego) obrabiarki [15],[33],[34],[45-46],[59],[90],[108], modelowaniu procesu skrawania [5],[26],[59],[74],[89],[106-107] czy rozwijaniu metod prognozowania wibrostabilności systemu O-PS [31-32],[43],[58-59],[74],[85]. Podejmowane są próby budowy zintegrowanych, wirtualnych modeli podsystemów obrabiarki CNC działających podczas obróbki [27],[41],[102],[109].

W ITM oraz CM realizowanych jest kilka projektów z obszaru doskonalenia technik modelowania obrabiarek. Jednym z intensywnie rozwijanych nurtów są badania nad zagadnieniami modelowania układów przewodnicowych obrabiarek, ze szczególnym uwzględnieniem modelowania tocnych zespołów przewodnicowych [33-34]. Opracowana została oryginalna metoda budowy modeli tego typu obiektów, z uwzględnieniem zjawisk kontaktowych występujących podczas pracy wózków przewodnicowych oraz tocnych śrub pociągowych. Na rys. 28 pokazano przykładowe wyniki symulacji rozkładu wartości (oznaczonych odpowiednio kolorami zgodnie z zamieszczoną skalą w $[\mu\text{m}]$) wypadkowych przemieszczeń końcówki wrzeciona w całej przestrzeni obróbkowej centrum frezerskiego, pod działaniem reprezentatywnej wypadkowej siły obciążającej ($P_w=1732\text{ N}$, składowe

$P_x=P_y=P_z=1000$ N). Obliczenia wykonano dla wariantu napędu w osi X ze śrubą pociągową, który z uwagi na duże wartości przemieszczeń względnych N-PO pod działaniem sił skrawania, zastąpiono później bezpośrednim napędem liniowym.

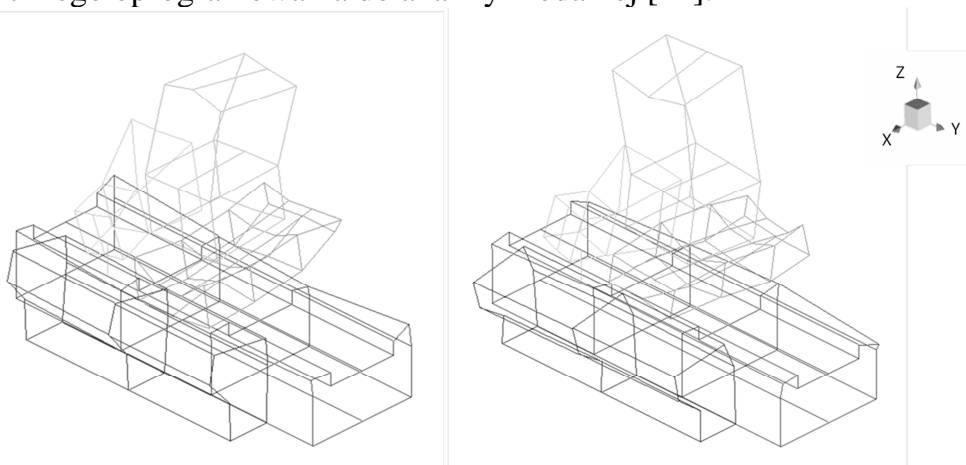


Rys. 28. Wyniki symulacji rozkładu wypadkowych przemieszczeń końcówki wrzeciona w całej przestrzeni roboczej obrabiarki

Fig. 28. Simulation results of the end of the spindle displacement distribution across the machine tool workspace

Niemniej ważnym zagadnieniem jest identyfikacja modeli dynamiki układu MDS obrabiarki. Z uwagi na złożoność tych modeli, uzyskanie ilościowo zgodnych wyników symulacji z odpowiednimi charakterystykami rzeczywistego obiektu wymaga zastosowania procedur identyfikacyjnych, obejmujących doświadczalny pomiar charakterystyk obrabiarki oraz procedury strojenia modelu.

W ITM do identyfikacji modeli układów MDS obrabiarek stosowane są techniki analizy modalnej. Na rys. 29 pokazano skrajne kadry jednej z form drgań zespołu korpusowego obrabiarki zarejestrowane w czasie badań doświadczalnych z użyciem specjalistycznego oprogramowania do analizy modalnej [22].

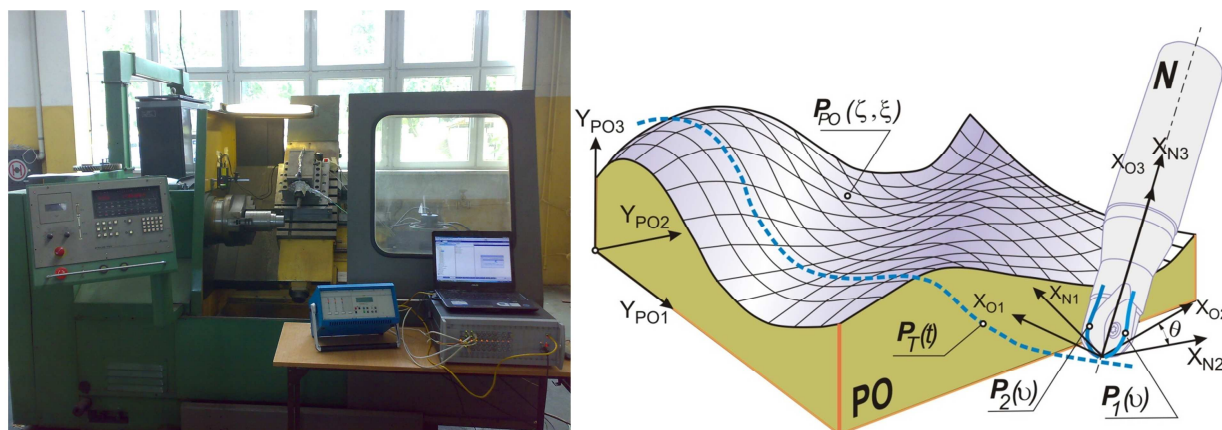


Rys. 29. Skrajne kadry formy drgań odpowiadającej częstotliwości 220.8 Hz badanej obrabiarki

Fig. 29. Extreme positions of the frame model of tested machine tool at 220.8 Hz vibration mode

W obszarze tej tematyki w ITM realizowany jest projekt badawczy o kryptonimie *MODALKA*, w ramach którego prowadzone są badania nad zagadnieniami wpływu szerokiej grupy czynników zewnętrznych (tj. masy czujników, sposobu realizacji wymuszenia, metod mocowania czujników, błędów parametrów geometrycznych opisujących rozmieszczenie czujników itp.) na wyniki estymacji wybranych charakterystyk dynamicznych obrabiarki, a następnie na dokładność prognozy wibrostanowienia systemu O-PS.

Kolejnym ważnym projektem z obszaru doskonalenia technik modelowania jest realizowany w ITM oraz CM projekt o kryptonimie *SKRAWATOR*. W ramach projektu zbudowane zostało specjalne stanowisko badawcze do identyfikacji modeli procesu skrawania wielostrzowymi narzędziami obrotowymi. Opracowano również metody symulacji procesu skrawania złożonych przestrzennie powierzchni przy obróbce pięcioosiowej. Do budowy modeli symulacyjnych zastosowano technologię NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) [74]. Na rys. 30 pokazano fotografię stanowiska pomiarowego sił skrawania na pojedynczym ostrzu freza oraz rysunek poglądowy ilustrujący metodę modelowania obróbki pięcioosiowej z zastosowaniem NURBS. Opracowane modele symulacyjne mogą być wykorzystane dla celów technologicznych oraz do predykcji drgań samowzbudnych w systemie O-PS.



Rys. 30. Stanowisko pomiarowe projektu SKRAWATOR oraz idea modelowania procesu skrawania z zastosowaniem techniki NURBS

Fig. 30. SKRAWATOR project test stand and the idea of modelling the cutting process using NURBS technology

Najnowszym programem badawczym realizowanym w ITM i CM z zakresu rozwoju technik modelowania i symulacji jest projekt o nazwie *LINIOWIEC*. W ramach projektu realizowane będą prace nad budową modeli symulacyjnych osi sterowalnych z napędem liniowym oraz konwencjonalną śrubą pociągową wraz z układem sterowania. Modele te posłużą do badań porównawczych, a ich dokładność zostanie zidentyfikowana na drodze doświadczalnej. Celem projektu jest opracowanie wytycznych dla konstruktorów na temat zastosowania w osiach serwonapędowych obrabiarek napędów bezpośrednich oraz rozwój algorytmów ich sterowania. Napędy bezpośrednie są coraz częściej stosowane w obrabiarkach CNC. Sterowane są tymi samymi metodami co silniki w konwencjonalnych napędach ze śrubą pociągową. Okazuje się jednak, że napędy bezpośrednie mimo wielu

zalet mają i wady. Jedną z nich jest silny wpływ na pracę napędu z silnikiem liniowym obciążenia zewnętrznego. Optymalnym rozwiązaniem sterowania takim układem byłaby, niespotykana obecnie, możliwość zmian parametrów regulatorów w zależności od charakteru obciążenia. Problemy te będą rozwiązywane w projekcie *LINOWIEC* na drodze symulacji i badań eksperymentalnych z zastosowaniem systemu sterowania *OCEAN/MARINE*, w którym możliwe są zmiany on-line parametrów w sterowniku napędu obrabiarki (najwyższy poziom otwartości systemu CNC).

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w tym artykule koncepcja budowy obrabiarki „inteligentnej” prezentuje najnowsze trendy w rozwoju konstrukcji i sterowania obrabiarek CNC. Na tle osiągnięć światowych przedstawiono prace badawcze realizowane w ITM oraz CM. Z uwagi na fakt, że członkowie zespołów badawczych ITM i CM niejednokrotnie pracują w różnych projektach jednocześnie, dla ułatwienia komunikacji wprowadzono system nazw kodowych dla poszczególnych projektów. Poszczególne realizowane prace badawcze stanowią próby rozwiązania problemów cząstkowych związanych z rozwojem koncepcji obrabiarki „inteligentnej”.

Pierwszym podstawowym problemem jest otwartość układu sterowania obrabiarki. Otwartość ta winna być zapewniona na wielu poziomach hierarchicznych działania systemu sterowania CNC. Potrzeba tej otwartości wynika z konieczności współpracy tego układu z licznymi układami diagnostycznymi, w jakie może być wyposażona obrabiarka.

Rozwój nowych systemów diagnostycznych jest kolejnym zadaniem badawczym w realizacji koncepcji obrabiarki „inteligentnej”. Systemy diagnozujące stan obrabiarki i sygnalizujące niekorzystne zjawiska dynamiczne, zachodzące podczas jej pracy, mogą być postrzegane jako swoiste systemy receptorów, wyposażające maszynę w zmysły stanowiące o poziomie jej „inteligencji”.

Poważnym zadaniem badawczym jest również rozwój metod komunikacji pomiędzy operatorem a obrabiarką. Stale rosnąca złożoność układów mechatronicznych, jakimi są obrabiarki CNC, komplikuje proces ich programowania. Ten stan rzeczy nie może utrudniać obsługi obrabiarki przez operatora. Wręcz przeciwnie, dąży się do uproszczenia procesu programowania i obsługi czyniąc go bardziej intuicyjnym i zrozumiałym. Wiele czynności sprawdzających i nadzorujących prawidłowość procesu programowania przenosi się na stronę systemu CNC.

Ważną kwestią jest rozwój metod modelowania złożonych systemów mechatronicznych oraz procesów roboczych stanowiących dynamiczny system O-PS. Wynika to z dwóch przesłanek. Po pierwsze, tak złożone systemy wymagają stosowania do ich projektowania nowych narzędzi z obszaru wirtualnego prototypowania konstrukcji, jak i układu sterowania. Po drugie, stosowania w procedurach diagnostycznych zaawansowanych – z konieczności – modeli symulacyjnych.

Przedstawione w tym artykule zadania badawcze nie wyczerpują wszystkich problemów związanych z rozwojem koncepcji obrabiarki „inteligentnej”, a jedynie są prezentacją głównych nurtów prowadzonych prac badawczo-rozwojowych.

LITERATURA

- [1] ABELE E., ALTINTAS Y., BRECHER C., 2010, *Machine tool spindle units*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59/781–802.
- [2] AL-REGIB E., NI J., LEE S.-H., 2003, *Programming spindle speed vibration for machine tool chatter suppression*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43/1229-1240.
- [3] ALTER D.M., TSAO T., 1996, *Control of linear motors for machine tool feed drivers: design and implementation of H1 optimal feedback control*, ASME Journal of Dynamic Systems Measurements and Control, 118/649-655.
- [4] ALTER D.M., TSAO T., 1998, *Control of linear motpors for machine tool feed drivers: experimental investigation of optimal feed forward tracking control*, ASME Journal of Dynamic Systems Measurements and Control, 120/137-141.
- [5] ALTINTAS Y., ENGIN S., 2001, *Generalized modeling of mechanics and dynamics of milling cutters*, Annals of the CIRP, 50/1/25-30.
- [6] ALTINTAS Y., EROL N.A., 1998, *Open architecture modular tool kit for motion and machining process control*, Annals of the CIRP, 47/1, 295-300.
- [7] ATTIA M.H., FRASER S., 1999, *A generalized modelling methodology for optimized real-time compensation of thermal deformation of machine tools and CMM structures*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39/1001–1016.
- [8] ATTIA M.H., FRASER S., OSMAN M.O.M., 1999, *On-line estimation of time-variant thermal load applied to machine tool structures using a s-domain inverse solution*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39, 985–1000.
- [9] AYERS T., NOLAN B., 2006, *Voice activated command and control with speech recognition over WiFi*, Science of Computer Programing, 59/1-2/109-126.
- [10] BALIC J., 2006, *Intelligent CAD/CAM systems for CNC programing - An overview*, Advances in Production Engineering and Management, 1/13-22.
- [11] BALIC J., KOROSSEC M., 2002, *Intelligent tool path generation for milling of free surfaces using neural networks*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42/1171–1179.
- [12] BANDYOPADHYAY B.P., BHATACHARYA R.K., 1991, *Chatter reduction in machine tools*, 42-nd Earthmoving Industry Conference, Illinois, USA, 1-8.
- [13] BENGIO Y., 1996, *Neural networks for speech and sequence recognition*, International Thomson Publishing, London.
- [14] BRECHER C., ESSER M., WITT S., 2009, *Interaction of manufacturing process and machine tool*, CIRP Annals Manufacturing Technology, 58/588–607.
- [15] CAO Y., ALTINTAS Y., 2007, *Modeling of spindle-bearing and machine tool systems for virtual simulation of milling operations*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47/1342–1350.
- [16] CERISARA C., DEMANGE S., HATON J.P., 2007, *On noise masking for automatic missing data soeech recognition*, Computer Speech & Language, 21/3/443-457.
- [17] CHEN J.-S., HSU W.-Y., 2003, *Characterizations and models for the thermal growth of a motorized high speed spindle*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43/1163–1170.
- [18] CHENG T., ZHANG J., HU CH., WU B., YANG S., 2001, *Intelligent machine tools in a distributed network manufacturing mode environment*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 17/221-232.
- [19] CHO S., ASFOUR S., ONAR A., KAUNDINYA N., 2005, *Tool breakage detection using support vector machine learning in a milling process*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45/241–249.
- [20] CHODŹKO M., 2006, *Zwiększenie wibrosterbilności systemu obrabiarka – proces skrawania, przez zastosowanie eliminatora drgań*, Politechnika Szczecińska, rozprawa doktorska, Szczecin.
- [21] CHO S., ASFOUR S., ONAR A., KAUNDINYA N., 2005, *Tool breakage detection using support vector machine learning in a milling process*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45/241–249.
- [22] CHODŹKO M., PAJOR M., 2011, *Badania modalne prototypu frezarki FV2 oraz prognozowanie jej wibrosterbilności*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 31/2/143-151.
- [23] CHUNG CH., PENG Q., 2004, *The selection of tools and machines on web-based manufacturing environments*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44/317–326.
- [24] DENKENA B., KALLAGE F., RUSKOWSKI M., POPP K., 2004, *Machine tool with active magnetic guides*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 53/1/333-336.
- [25] DOMEK S., PAJOR M., PIETRUSEWICZ K., URBAŃSKI Ł., 2009, *Otwarty modułowy system sterowania obrabiarki CNC*, Modelowanie Inżynierskie, 6/37/77-82.

- [26] EHMANN K.F., KAPOOR S.G., DEVOR R.E., LAZOGLU I., 1997, *Machining process modeling: A Review*, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 119/655-663.
- [27] ERKORKMAZ K., ALTINTAS Y., YEUNG C.H., 2006, *Virtual computer numerical control system*, Annals of the CIRP, 55/1.
- [28] EROL N.A., ALTINTAS Y., ITO M., 2000, *Open architecture modular tool kit for motion and machining process control*, ASME/IEEE Transactions on Mechatronics, 5/3/281-291.
- [29] G.PRITSCHOW, KRAMER C., 2005, *Open system architecture for drives*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54/1/375-378.
- [30] HSUE A.W.J., YAN M.-T., KE S.-H., 2007, *Comparison on linear synchronous motors and conventional rotary motors driven Wire-EDM processes*, Journal of Materials Processing Technology, 192-116/478-485.
- [31] INSPERGER T., MANN B.P., STEPAN G., BAYLY P.V., 2003, *Stability of up-milling and down-milling, part I: Alternative analytical methods*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43/25-34.
- [32] INSPERGER T., STEPAN G., 2000, *Stability of high-speed milling*, Proceedings of Symposium on Nonlinear Dynamics and Stochastic Mechanics, AMD - Orlando, 241/1-5.
- [33] JASTRZĘBSKI D., MAJDA P., PAWEŁKO P., 2010, *Obliczenia układu nośnego frezarek o różnych strukturach geometryczno-ruchowych*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 30/2/145-154.
- [34] JASTRZĘBSKI D., MAJDA P., PAWEŁKO P., SZWENGIER G., 2010, *Wpływ technik modelowania mechanizmów śrubowo-tocznych na czas i dokładność ich obliczeń*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 30/2/155-161.
- [35] JAYARAM S., KAPOOR, DEVOR R.E., 2000, *Analytical stability analysis of variable spindle speed machining*, Transactions of ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122/391-397.
- [36] JĘDRZEJEWSKI J., 2011, *Doskonalenie obrabiarek – trendy, redukcja błędów i dokonania producentów – cz. I*, Technologie i urządzenia, maj-czerwiec, 72-75.
- [37] JĘDRZEJEWSKI J., 2011, *Doskonalenie obrabiarek – trendy, redukcja błędów i dokonania producentów – cz. II*, Technologie i urządzenia, lipiec-sierpień, 18.
- [38] JĘDRZEJEWSKI J., KOWAL Z., KWAŚNY W., MODRZYCKI W., 2005, *High-speed precise machine tools spindle units improving*, Journal of Materials Processing Technology, 162-163/615-621.
- [39] JĘDRZEJEWSKI J., KOWAL Z., KWAŚNY W., MODRZYCKI W., 2004, *Hybrid model of high speed machining centre headstock*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 53/1/285-288.
- [40] JĘDRZEJEWSKI J., MODRZYCKI W., KOWAL Z., KWAŚNY W., WINIARSKI Z., 2007, *Precise modelling of HSC machine tool thermal behaviour*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 24/1/245-252.
- [41] KADIR A.A., XU X., HAMMERLE E., 2011, *Virtual machine tools and virtual machining - a technological review*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27, 494-508.
- [42] KALIŃSKI K., KUCHARSKI T., SAWIAK S., 2001, *Nadzorowanie drgań narzędzia za pomocą ciągłej zmiany prędkości obrotowej wrzeciona*, Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining, Metz, 241-250.
- [43] KAMAR-NAGY T., MOON F.C., 2004, *Mode-coupled regenerative machine tool vibrations*, W: Nonlinear Dynamics of Production Systems, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 129-151.
- [44] KIM D.-H., SONG J.-Y., LEE J.-H., CHA S.-K., 2009, *Development and evaluation of intelligent machine tools based on knowledge evolution in M2M environment*, Journal of Mechanical Science and Technology, 23/2807-2813.
- [45] KOLÁŘ P., 2007, *Vysokootáčková vřetena NC obráběcích strojů*, Rozprawa doktorska, Praga.
- [46] KOLAR P., SULITKA M., JANOTA M., 2011, *Simulation of dynamic properties of a spindle and tool system coupled with a machine tool frame*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 54/11-20.
- [47] KOSMOL J., 1998, *Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie*, WNT, Warszawa.
- [48] KUO L.Y., YEN J.-Y., 2001, *Servo parameter tuning for a 5-axis machine center based upon GA rules*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41/1535-1550.
- [49] LAGÓ T.L., OLSON S., HÁKANSON L., CLAESSON I., 2002, *Performance of a chatter control system for turning and boring applications*, 4th GRACM Congress on Computational Mechanics, Patras, 1-8.
- [50] LEE S.W., KIM D.H., SONG J.Y., LEE H.K., 2005, *Agent-based decision support system for realizing intelligent machine tools*, 2005 WSEAS Int. Conf. on Dynamical Systems and Control, Venice, Italy, 85-90.
- [51] LEI M., YANG X., TSENG M.M., YANG S., 1998, *Design an intelligent machine center strategy and practice*, Mechatronics, 8/271-285.
- [52] LIM H.S., SON S.M., WONG Y.S., RAHMAN M., 2007, *Development and evaluation of an on-machine optical measurement device*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47/1556-1562.
- [53] LIU Q., ALTINTAS Y., 1999, *On-line monitoring of flank wear in turning with multilayered feed-forward neural network*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39/1945-1959.

- [54] LIU Y., GUO X., LI W., YAMAZAKI K., KASHIHARA K., FUJISHIMA M., 2007, *An intelligent NC program processor for CNC system of machine tool*, Journal Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 23/2/1-19.
- [55] LUHMANN T., ROBSON S., KYLE S., HARLEY I., 2008, *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications*, John Wiley & Sons, New York.
- [56] MAJDA P., 2009, *Symulacyjne badania dokładności geometrycznej trójosiowej obrabiarki skrawającej*, MWTW, materiały konferencyjne, Poznań-Zerków, 263-268.
- [57] MAJEWSKI M., 2010, *Podstawy budowy inteligentnych systemów interakcji urządzeń technologicznych i ich operatorów*, Politechnika Koszalińska, Koszalin.
- [58] MANN B.P., INSPERGER T., BAYLY P.V., STEPAN G., 2003, *Stability of up-milling and down-milling, part 2: experimental verification*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43/35-40.
- [59] MARCHELEK K., 1991, *Dynamika obrabiarek*, WNT, Warszawa.
- [60] MARIETTA M., 1994 *Next generation controller specification for an open system architecture standard (SOSAS) NGC project report*, USA.
- [61] MEKID S., PRUSCHEK P., HERNANDEZ J., 2009, *Beyond intelligent manufacturing: A new generation of flexible intelligent NC machines*, Mechanism and Machine Theory, 44/466-476.
- [62] MÖHRING H.-C., LITWINSKI K.M., GÜMMER O., 2010, *Process monitoring with sensory machine tool components*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59/383-386.
- [63] MORALES-VELAZQUEZ L., RENE DE JESUS R.-T., OSORNIO-RIOS R.A., HERRERA-RUIZ G., CABAL-YEPEZ E., 2010, *Open-architecture system based on a reconfigurable hardware-software multi-agent platform for CNC machines*, Journal of Systems Architecture, 56/407-418.
- [64] MORGAN G., CHENG R.Q., ALTINTAS Y., RIDGWAY K., 2007, *An expert troubleshooting system for the milling process*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47/1417-1425.
- [65] MORI N., YAMAZAKI K., FUJISHIMA M., LIU J., FURUKAWA N., 2001, *A study on development of an open servo system for intelligent control of a CNC machine tool*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 50/1/247-250.
- [66] MORIWAKI T., 2008, *Multi-functional machine tool*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57/1/736-749.
- [67] NEUGEBAUER R., DENKENA B., WEGENER K., 2007, *Mechatronic systems for machine tools*, Annals of the CIRP, 56/2/657-686.
- [68] NEWMAN S.T., NASSEHI A., 2009, *Machine tool capability profile for intelligent process planning*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58/421-424.
- [69] NEUGEBAUER R., DENKENA B., WEGENER K., 2007, *Mechatronic systems for machine tools*, Annals of the CIRP, 56/2/657-686.
- [70] OLSZEWSKI J., 2010, *Badania właściwości eksploatacyjnych stołu obrotowego sterowanego numerycznie z napędami bezpośrednimi*, Politechnika Poznańska, praca doktorska, Poznań,.
- [71] OMAC API WORK GROUP, 1999, *OMAC API SET working document, version 0.20*, USA,.
- [72] *Open system architecture for controls within automation (OSACA) systems*, OSACA CONSORTIUM, ESPRIT III project Final Report, UE, 1996.
- [73] OSE CONSORTIUM, 1998, *Development of open system environment for controller (OSEC)*, OSEC-II project technical report, Japonia.
- [74] PAJOR M., 2006, *Wibrostaбільność skrawania wieloostrowymi narzędziami obrotowymi*, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, 597.
- [75] PAJOR M., PARUS A., HOFFMANN M., 2009, *Modelowanie charakterystyki pracy siłownika piezoelektrycznego zastosowanego do konstrukcji eliminatora drgań*, Modelowanie Inżynierskie, 6/37/225-233.
- [76] PARUS A., DOMEK S., MARCHELEK K., 2006, *Efficiency of vibration absorber control methods in machining*, Proc. 11-th Nonlinear Vibrations, Stability, and Dynamics of Structures Conference, Blacksburg, USA, 125-127.
- [77] PARUS A., PAJOR M., HOFFMANN M., 2009, *Suppression of self-excited vibration in cutting process using piezoelectric and electromagnetic actuators*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 33/4, 35-50.
- [78] PRICKETT P.W., JOHNS C., 1999, *An overview of approaches to end milling tool monitoring*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39/105-122.
- [79] PRITSCHOW G., ALTINTAS Y., JOVANE F., KOREN Y., MITSUISHI M., TAKATA S., BRUSSEL H. van, WECK M., YAMAZAKI K., 2001, *Open controller architecture - past, present and future*, Annals of the CIRP, 50/2/463-470.
- [80] RAMESH R., MANNAN M.A., POO A.N., 2000, *Error compensation in machine tools – A review, Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture dependent errors*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40/1235-1256.
- [81] RAMESH R., MANNAN M.A., POO A.N., 2005, *Tracking and contour error control in CNC servo systems*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43/301-326.

- [82] RENÉ DE JESÚS R.-T., GILBERTO H.-R., IVÁN T.-V., CARLOS J.-C.J., 2003, *Driver current analysis for sensorless tool breakage monitoring of CNC milling machines*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43/1529–1534.
- [83] ROWE W.B., CHEN Y., MORUZZI J. L., MILLS B., 1997, *A generic intelligent control system for grinding*, Computer Integrated Manufacturing System, 10/3/231-241.
- [84] RZEVSKI G., 2003, *On conceptual design of intelligent mechatronic systems*, Mechatronics, 13/1029–1044.
- [85] SASTRY S., KAPOOR S.G. DEVOR R.E., 2002, *Floquet theory based approach for stability analysis of the variable speed face-milling process*, Transactions of ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124/10-17.
- [86] SCHMANDT C., 1994, *Voice communication with computers*, Van Nostrand Reinhold ITP, New York.
- [87] SCHWEITZER G., MASLEN E.H., 2009, *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*, Springer-Verlag, Berlin.
- [88] SHIU CH., WASHBURN M.J., WANG S., RAVISHANKAR CH.V., SHIN K.G, 1998, *Specifying reconfigurable control flow for open architecture controllers*, Proc.1998 Japan-USA Symp. on Flexible Automation.
- [89] SMITHEY D.W., KAPOOR S.G., DEVOR R.E., 2000, *A worn tool force model for three-dimensional cutting operations*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40/1929-1950.
- [90] SMOLÍK J., 2007, *Nosné díly obráběcích strojů z nekonvenčních materiálů*, Rozprava doktorska, Praga.
- [91] TARNG Y.S. , CHUANG H.Y., HSU W.T., 1999, *Intelligent cross-coupled fuzzy feedrate controller design for CNC machine tools based on genetic algorithms*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39/1673–1692.
- [92] TSENG P.C., CHOU A., 2002, *The intelligent on-line monitoring of end milling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42/89–97.
- [93] TUREK P., MODRZYCKI W., JĘDRZEJEWSKI J., 2010, *Analiza metod kompensacji błędów obrabiarek*, Inżynieria Maszyn, 15/1-2/130-149.
- [94] TUREK P., KWAŚNY W., JĘDRZEJEWSKI J., 2010, *Analiza zaawansowanych metod identyfikacji błędów obrabiarek*, Inżynieria Maszyn, 15/1-2/7-36.
- [95] URBAŃSKI Ł., PIETRUSEWICZ K., MAJDA P., 2010, *Badania doświadczalne właściwości dynamicznych napędu posuwu obrabiarki CNC*, Mechanik, 3/162-168.
- [96] WANG M., RENYUAN F., 1999, *Chatter suppression based on nonlinear vibration characterisric of electro-rheological fluids*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39/1925-1934.
- [97] WINIARSKI Z., KOWAL Z., KWAŚNY W., HA J.Y., 2010, *Modelowanie cieplnego zachowania się wrzeciennika ze złożonym napędem*, Inżynieria Maszyn, 15/1-2/116-129.
- [98] WOONG M., CHA J.-H., PARK J.-H., KANG M., 1999, *Development of an intelligent design system for embodiment design of machine tools*, Annals of the CIRP, 48/7/329-332.
- [99] WORONKO A., HUANG J., ALTINTAS Y., 2003, *Piezoelectric tool actuator for precision machining on conventional CNC turning centers*, Precision Engineering, 27/ 335–345.
- [100] XIONG-BO M., ZHEN-YU H., YONG-ZHANG W., HONG-YA F., 2007, *Development of a PC-based open architecture software-CNC system*, Chinese Journal of Aeronautics, 20/272-281.
- [101] XU X.W. , NEWMAN S.T., 2006, *Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent—a review of the technologies*, Computers in Industry, 57/141–152.
- [102] YEUNG CH.-H., ALTINTAS Y., ERKORKMAZ K., 2006, *Virtual CNC system. Part I. System architecture*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46/1107–1123.
- [103] YILMAZ A., AL-REGIB E., NI J., 2002, *Machine chatter suppression by multi-level random spindle speed variation*, Transactions of ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124/208-216.
- [104] YONGLIN C., JIANGUO C., ZUYU W., 2003, *Platform for an open architecture controller based on a general operation system with a hard real-time extension*, International Journal of Production Research, 41/2839-2850.
- [105] YONGLIN CH., 2005, *An evaluation space for open architecture controllers*, Int. J. Adv. Manuf. Technology, 26/351-358.
- [106] YOON M.C., KIM Y.G., 2004, *Cutting dynamic force modeling of endmilling operation*, Journal of Materials Processing Technology, 155-156/1383-1389.
- [107] YUN W.-S., CHO D.-W., 2001, *Accurate 3-D cutting force prediction using cutting condition independent coefficients in end milling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41/463-478.
- [108] ZAEH M., SIEDL D., 2007, *A new method for simulation of machining performance by integrating finite element and multi-body simulation for machine tools*, Annals of the CIRP, 56/1/383-386.
- [109] ZAEH M.F., POERNBACHER C., 2005, *A model-based method to develop PLC software for machine tools*, Annals of the CIRP, 54/1/371–374.
- [110] <http://www.heidenhain.com>
- [111] <http://www.automation.siemens.com/mc/mc/en/automation-systems/cnc-sinumerik/Pages/cnc-systems.aspx>

[112] <http://www.fanucfa.com/pl-pl/Home>

[113] <http://www.dmgmoriseikiusa.com/original-technologies#dcg>

[114] <http://www.johnhartmachinetools.com.au/technology/intelligent-machine/>

[115] http://www.moriseiki.com/english/products/app/mapps_iv_index.html

[116] <http://www.system3r.com/3r/en/products-services/products/precision-production/vdp.aspx>

ASPECTS OF CREATION OF INTELLIGENT MACHINE TOOL CONCEPT

The article presents the concept of building "intelligent" machine tools, equipped with the appropriate diagnostic systems to monitor their work. Global trends in the development of this concept and research projects at the Institute of Mechanical Technology and the Centre for Mechatronics functioning at the Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics, West Pomeranian University of Technology in Szczecin is presented. Presented research projects are the work within selected aspects of developing "intelligent" machine tools diagnostics such as compensation of thermal deformations, volumetric error, machine vision. In addition, selected research projects address the development of modern techniques of modeling and control mechatronics systems, where "intelligent" machine tool is classified.