

Nowoczesne funkcje diagnostyczne we współczesnych sterownikach NC

State of the art diagnostic functions used in recent numerical controllers

PIOTR SZULEWSKI*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.1.1

Omówiono innowacje programowo-techniczne w dziedzinie sterowników CNC, zaprezentowane podczas targów EMO Milano 2015, w tym: ideę Industry 4.0, nowe koncepcje sterowania, oprogramowanie wspomagające proces wytwarzania, systemy monitorowania stanu obrabiarek oraz procesu, komunikację z obrabiarkami za pomocą sieci przemysłowych, zdalną diagnostykę.
SŁOWA KLUCZOWE: EMO 2015, Industry 4.0, monitorowanie i nadzorowanie obrabiarek CNC, sieci przemysłowe

Explained in the paper are state of the art software/technological innovations introduced to the machine tools CNC controllers presented at EMO Milano 2015 including: the concept of Industry 4.0, new ideas in control functions, computer aided production software, the machine tool status and cutting operation monitoring, communication via field buses, remote diagnosis.

KEYWORDS: EMO 2015, Industry 4.0, machine CNC monitoring and supervision, communication

Na targach EMO Milano 2015, które odbywały się w dniach 5÷10 października, zaprezentowano ponad 6600 obrabiarek, robotów oraz maszyn technologicznych o wartości ok. 0,5 mld euro, co – jak się wydaje – stanowiło dość precyzyjny przegląd aktualnej oferty producentów (ok. 1600 przedsiębiorstw) i pozwoliło na wskazanie perspektyw rozwoju tej branży. Ekspozycje o łącznej powierzchni niemal 120 tys. m² były rozlokowane tematycznie w 12 halach. Jak podają organizatorzy, targi odwiedziło ponad 155 tys. osób z ok. 120 krajów.

Industry 4.0 – czwarta rewolucja przemysłowa

Główne hasło ostatnich targów EMO, czyli Industry 4.0, należy rozumieć jako ideę nowoczesnej fabryki przyszłości. Termin Industry 4.0 po raz pierwszy został użyty w 2011 r., a pełnego opisu doczekał się w 2013 r. Mimo że tę koncepcję opracował i promuje niemiecki rząd federalny, to jednak zakres jej oddziaływania jest ponadnarodowy. Nadrzędny cel Industry 4.0 to zwiększenie konkurencyjności przemysłu poprzez intensywne wprowadzanie nowoczesnych technologii informatycznych do procesów wytwarzania i produkcji.

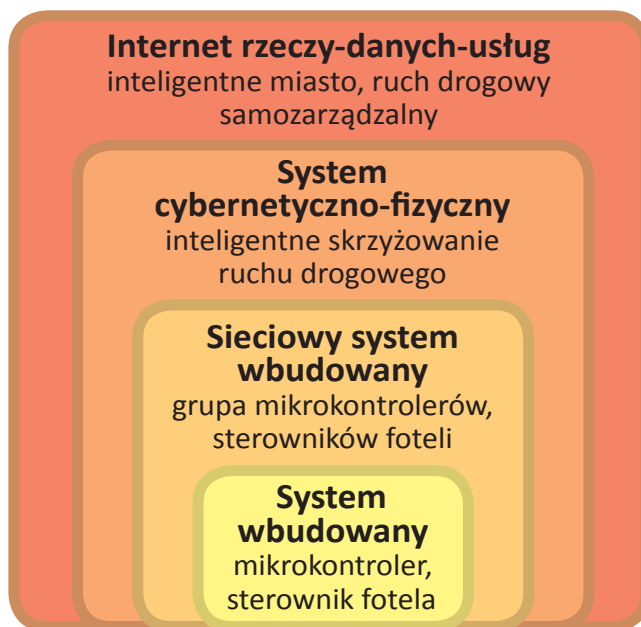
W tradycyjnym ujęciu głównym celem realizacji produkcji jest zapewnienie jak najniższych kosztów wytwarzania przy maksymalnej wydajności procesu, a w efekcie – generowanie odpowiedniego zysku i zachowanie wysokiej pozycji w branży. Dane dotyczące produkcji (materiałów, produkowanych przedmiotów, obrabiarek, systemów transportowych i magazynowych), które nie zawsze są gromadzone w sposób automatyczny czy *on-line*, wykorzystuje się w późniejszej analizie służącej zidentyfikowaniu wąskich gardeł czy oszacowaniu efektywności produkcji, zużycia energii, materiałów itp. Dla kierownictwa fabryki takie informacje stanowią bezcenny materiał umożliwiający wyjaśnienie przyczyn powstawania problemów i ewentualnych usterek w systemie produkcyjnym.

Inaczej niż w ujęciu tradycyjnym w zakładzie zgodnym z ideą Industry 4.0 wszystkie urządzenia biorące udział w realizacji procesu technologicznego oferują zaawansowa-

ną technikę monitorowania i autodiagnostyki. Zabudowane w ich sterownikach inteligentne oprogramowanie zapewnia uzyskanie bezzwłocznej i bardzo dokładnej (wnikliwej) informacji o stanie obiektu oraz procesu. Dodatkowo te informacje są dostępne dla innych urządzeń dzięki systemowi efektywnych sieci komunikacyjnych pracujących w strukturze „każdy z każdym” (*peer-to-peer*). W ten sposób możliwe staje się przewidywanie ewentualnych awarii oraz ich skuteczne uprzedzanie, co pozytywnie wpływa na osiąganą produktywność i minimalizowanie czasu przestoju.

Według propagowanej idei pełna cyfryzacja stanowi *conditio sine qua non* skutecznego zwiększenia wydajności produkcji, poprawienia jej efektywności oraz uzyskania prawdziwej elastyczności procesów wytwarzania. Należy też podkreślić, że integracja technik wytwarzania i produkcji z innowacyjnymi systemami oprogramowania oraz przetwarzania danych zmierza w kierunku fuzji świata wirtualnego z rzeczywistym – stanowi to wyznacznik nowej ery przemysłowej.

Historycznie pierwsza rewolucja przemysłowa była związana z maszynami parowymi i ich zastosowaniem do mechanizacji wytwarzania, druga – z wykorzystaniem elektryczności do napędu rozmaitych maszyn i urządzeń (co skutkowało masową produkcją), natomiast trzecia właśnie trwa i rozszerza użycie technik informatycznych oraz programowalnych sterowników w celu powszechnej automatyzacji produkcji. Zbliżająca się czwarta rewolucja przemysłowa zakłada wykorzystanie zaawansowanych cyfrowych modeli produktów, które będą wytwarzane w inteligentnych fabrykach (*smart factories*), charakteryzujących się niespotykaną wcześniej elastycznością, niezawodnością i wydajnością. Na rys. 1 pokazano ewolucję układów mikroelektroniki jako przykład rozwoju systemów cybernetycznych – od mikrokontrolera do całkowicie zintegrowanego środowiska sieciowego.



Rys. 1. Przykład ewolucji aż do pełnej integracji

* Dr inż. Piotr Szulewski (maxer@cim.pw.edu.pl) – Instytut Techniki Wytwarzania, Zakład Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem, Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej

Wśród cech nowej koncepcji można wyodrębnić sześć unikalnych, takich jak:

- **interoperacyjność** – składnikami inteligentnych fabryk będą tzw. systemy cyberfizyczne (*cyber-physical systems*) obejmujące obrabiarki, systemy transportu wewnątrzoperacyjnego, stanowiska kontroli itp. Wszystkie te współpracujące ze sobą elementy będą określały i realizowały optymalną metodę wytwarzania i dostarczenia produktu do klienta. Wzajemna wymiana informacji będzie się odbywać za pomocą internetu oraz krótkodystansowych łączy (także bezprzewodowych);
- **wirtualizacja** – oznaczająca szerokie wykorzystanie technik wirtualnych i rzeczywistości rozszerzonej (*augmented reality*) w celu tworzenia wirtualnej kopii środowiska wytwórczego zakładu. W tym przypadku użyteczne będą dane pozyskane z czujników i środowisk monitorowania oraz zaawansowane modele symulacyjne;
- **decentralizacja** – czyli zdolność systemów cyberfizycznych wchodzących w skład inteligentnej fabryki przyszłości do samodzielnego podejmowania decyzji w celu ograniczenia lub wyeliminowania problemów wytwarzania;
- **szybkość reakcji** – zdolność środowisk wytwórczych do szybkiej i przewidywalnej reakcji na zdarzenia, zgodnie w wymaganiami pracy w systemach czasu rzeczywistego (*real-time systems*), dzięki gromadzeniu, przetwarzaniu i udostępnianiu szczegółowych danych o realizowanej produkcji;
- **usługowość** – działanie inteligentnej fabryki ma być zorientowane na oferowanie oczekiwanych przez klientów usług, które będą realizowane przez systemy cybernetyczno-fizyczne, pracowników, systemy transportowe i inne komunikujące się za pomocą sieci internet;
- **modułowość** – polegająca na elastycznej adaptacji fabryki przyszłości do zmieniających się wymagań związanych z wytwarzaniem produktem, dzięki inteligentnemu dołączaniu bądź eliminowaniu koniecznych modułów.

Inteligentne fabryki będą miały zdolność samoplanowania i samoadaptacji, a wszystkie wytwarzane produkty – swoje w pełni cyfrowe modele, które będą mogły być dowolnie przesyłane pomiędzy fabrykami.

Implementacja tej idei w rzeczywistych zakładach przemysłowych może napotkać liczne trudności, dlatego oprócz niechęci wykonawców przed wprowadzaniem nowych rozwiązań technicznych i organizacyjnych trzeba również wziąć pod uwagę konieczność:

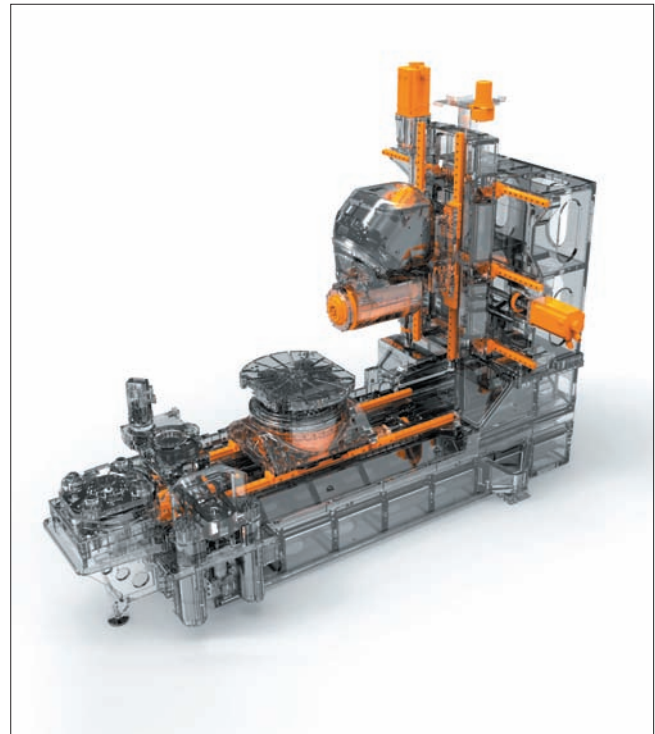
- zapewnienia bezpieczeństwa dostępu do danych i zachowania ich poufności po dołączeniu wewnętrznej sieci zakładu do internetu, co w praktyce oznacza jej otwarcie,
- zapewnienia stabilności połączenia oraz minimalizacji czasu opóźnienia transmisji danych w przypadku zastosowania standardów komunikacji krótkodystansowej, zwłaszcza M2M (maszyna–maszyna),
- podjęcia działań w celu osiągnięcia integralności poszczególnych procesów technologicznych,
- wykonania kosztownych testów i zweryfikowania używanych narzędzi programowych, aby uniknąć błędów zagrażających ciągłości produkcji,
- skutecznej ochrony unikalnej wiedzy technologicznej zawartej w udostępnianych programach obróbki NC,
- unikania zbędnej nadmiarowości sił i zasobów wynikających z wymogu zachowania elastyczności produkcji.

Wspomniane trudności nie powinny jednak spowolnić procesu wprowadzania koncepcji Industry 4.0 w życie. Zgodnie z optymistycznymi prognozami urzeczywistnienie tej idei zajmie 10÷20 lat i przyniesie zwiększenie wydajności produkcji o 25%.

Obrabiarka przyszłości

Obecnie producenci obrabiarek starają się oferować produkty w standardzie jak najbardziej zbliżonym do idei Industry 4.0. Są to więc urządzenia umożliwiające predykcję stanów awaryjnych, samoczynnie kontrolujące działania związane z przeglądami konserwacyjnymi lub pozwalające

na reorganizację ciągu technologicznego w razie zaistnienia zmian w produkcji. Taką obrabiarkę o oznaczeniu kodowym DMC 80 FD duoBlock zaprezentowała na targach w Mediolanie firma DMG Mori. Przekrój aksonometryczny tej maszyny zamieszczono na rys. 2.



Rys. 2. Przekrój aksonometryczny obrabiarki DMC 80 FD duoBlock (źródło: DMG Mori)

To 5-osiowe centrum frezarskie, umożliwiające zaawansowane toczenie i wyposażone w zmieniacz palet, jest nadzorowane przez nowoczesny sterownik klasy Celos. Na uwagę zasługuje fakt, że ta obrabiarka ma ponad 60 niezależnych czujników, rozmieszczonych w węzłowych punktach korpusu i zespołach napędowych, mierzących na bieżąco wartości drgań, sił, temperatury i ciśnienia. Pomiary drgań we wszystkich napędzanych osiach są rejestrowane za pomocą trójosiowych czujników przyspieszenia. Czujniki temperatury zabudowano w łożyskach wrzeciona, a czujniki rozwijanej siły – w napędach posuwów. Zużycie środków smarnych jest monitorowane za pomocą czujników przepływu. Wszystkie mierzone wielkości są przesyłane do sterownika CNC i dodatkowo udostępniane aplikacjom diagnostycznym pracującym w chmurze, analizującym za pomocą zaawansowanych algorytmów aktualny stan obrabiarki i prognozującym jej zachowanie w przyszłości.

Współczesne sterowanie NC

Dotychczas zdecydowana większość obrabiarek miała sterowanie CNC w postaci „czarnej skrzynki” dostarczanej przez producenta, zatem użytkownik praktycznie nie miał możliwości samodzielnego skonfigurowania sterownika. Zadania sterowania NC polegały przede wszystkim na generowaniu toru ruchu narzędzia i zarządzaniu poszczególnymi funkcjami obrabiarki (magazynem narzędzi, chłodziwem, transportem wiórów, paletami itp.), funkcje kontrolno-diagnostyczne były zaś ograniczone do minimum, a współpraca z zakładową siecią informatyczną była zazwyczaj opcją dodatkowo płatną. Produkty NC, które można było obejrzeć na ubiegłorocznych targach EMO, stanowią całkowite zaprzeczenie tradycyjnego podejścia do tematu sterowników. W tym obszarze da się zaobserwować trzy główne tendencje.

Po pierwsze w sterownik NC standardowo wbudowuje się interfejs komunikacji sieciowej. Najczęściej jest to sieć komputerowa ethernet, choć pojawiają się także specjalizowane magistrale sieci przemysłowych, będących obecnie jedyną formą komunikowania się sterownika NC z napędami i innymi urządzeniami peryferyjnymi obrabiarki (magazynami, systemami transportowymi itp.).

Po drugie sterowniki NC wyposaża się w możliwość współpracy z różnorodnymi czujnikami lub zestawami pomiarowymi służącymi do bardzo dokładnego monitorowania stanu maszyny i przedmiotu obrabianego oraz realizowanego procesu technologicznego.

Po trzecie obserwuje się intensywne działania mające na celu ułatwienie operatorowi obsługi obrabiarki. Instalowane są specjalne panele dotykowe oraz oprogramowanie pozwalające na wspieranie zadań technologicznych (poprzez dostęp do rysunków, kart instrukcyjnych, baz narzędzi itp.) i serwisowych (przez przypomnienie o pracach konserwacyjnych, elektroniczną DTR, pomoc *on-line*, teleserwis itp.). We współczesnych sterownikach CNC coraz częściej pojawiają się funkcje, które do tej pory były dostępne w stacjonarnych systemach komputerowych i które zdecydowanie poprawiają ich funkcjonalność z punktu widzenia operatorów. Przeglądarki projektów wykonywanych w środowisku CAD zapewniają pełny wgląd w szczegółową dokumentację projektową, czytniki plików graficznych różnych formatów (np. PDF) umożliwiają przesyłanie kompletnej dokumentacji technologicznej, a przeglądarki stron internetowych ułatwiają wzajemną komunikację pomiędzy operatorami i technologami/konstruktorami (dzięki grafice, wiadomościom tekstowym, listom), a ponadto stanowią efektywne interfejsy wymiany danych z systemami zarządzania klasy ERP.

Jak się wydaje, obecnie wszystko zmierza do celu wyznaczonego wcześniej przez koncepcję układów sterowania o architekturze otwartej (*open architecture numerical control system*). Ten epokowy pomysł zakładał dekompozycję tradycyjnych funkcji NC na szereg niezależnych modułów programowych realizujących wszystkie funkcje sterowania i posiadających zunifikowane interfejsy do współpracy ze światem zewnętrznym. Właśnie takie tendencje można zaobserwować, jeśli przeanalizuje się dostępne dziś konstrukcje różnych producentów.

Dalej przedstawiono najciekawsze i – zdaniem autora – najbardziej charakterystyczne funkcje, koncepcje oraz możliwości sterowników NC różnych producentów, ze szczególnym naciskiem na nowości funkcjonalne, programowe i sprzętowe.

Yamazaki Mazak

Firma wprowadziła monitorowanie wartości prądu zasilającego wrzeciono i poszczególne napędy. Informacja o wartości prądu pochodzi ze wzmacniaczy. Analiza otrzymanych wyników pozwala na wykrywanie wibracji. Dodatkowo za pomocą innych czujników zainstalowanych we wrzecionie mierzone są: temperatura, wibracje i odkształcenie (przesunięcie osi). W centrach tokarskich specjalnie zainstalowano czujnik drgań w mocowaniu narzędzia – w razie wykrycia drgań (przekroczenia amplitudy 2 μm) automatycznie korygowana jest wartość posuwu. Wygląd panelu HMI pokazano na rys. 3.

W sterowniku jest zaprogramowana automatyczna kompensacja błędów posuwu/kształtu w razie zmiany temperatury otoczenia obrabiarki, oparta na danych z przeprowadzonych wcześniej badań odkształceń korpusu maszyny w funkcji temperatury otoczenia. Na panelu operatora wyświetla się – w formie wykresu – zmierzona temperatura oraz wielkość i kierunek korekcji zastosowanej przez sterownik. Efektem jest zminimalizowanie błędów geometrycznych, pochodzących od odkształceń cieplnych korpusu obrabiarki, do wartości poniżej 0,007 mm przy zmianie temperatury otoczenia o 8°C. W przypadku obróbki skomplikowanych kształ-



Rys. 3. Pulpit operatora sterownika NC firmy Yamazaki Mazak (źródło: Yamazaki Mazak)

tów (naroży, kieszeni, wnęk) specjalne algorytmy sterowania powodują redukcję ewentualnych drgań i poprawiają wygląd uzyskanej powierzchni (wyglądanie).

Ciekawostką są funkcje służące do kontroli zużycia energii elektrycznej. Na ekranie sterownika wyświetlają się wykresy pokazujące wartości: chwilowego zużycia energii, energii zużywaną na wykonanie przedmiotu czy serii przedmiotów, zużycia energii we wskazanym okresie (dniu, tygodniu, miesiącu, roku). Szacowana jest także wartość emisji dwutlenku węgla związana z realizowaną pracą.

Aby ułatwić wzajemne komunikowanie się operatora z obrabiarką, wykorzystano w niej głosowe odczytywanie wydanych poleceń.

NUM

Rozwiązania tej firmy są przykładem szerokiego zastosowania sieci przemysłowych do komunikacji pomiędzy różnymi zespołami współczesnej obrabiarki. Najnowszy sterownik CNC systemu Flexium+ do łączności pomiędzy NCK a HMI wykorzystuje standard RTEthernet. Wymiana danych między NCK a napędami następuje za pomocą magistrali NUM Servobus. Sterownik PLC jest dołączony do panelu HMI poprzez sieć EtherCAT (*ethernet for control automation technology*). Współpraca PLC ze sterownikami napędów odbywa się za pomocą magistrali FSoE (*fail safe over EtherCAT*). Możliwe jest także sterowanie napędami osi za pomocą magistrali CANopen.

Fanuc

Sterownik tej marki jest przygotowany do nanoobróbki – standardowy krok interpolacji wynosi 0,1 nm. Moc obliczeniowa procesora pozwala na jednoczesne sterowanie 96 osiami i 24 wrzecionami, a do zapewnienia wewnętrznej komunikacji stosowane są sieci. Fanuc Serial Servo Bus Read jest specjalną szyną danych do komunikacji NC ze sterownikami napędów. Specjalizowana szyna komunikacyjna HSSB (*high speed serial bus*) jest wykorzystywana do dołączenia firmowych sterowników PLC (Fanuc FOCAS). Sterownik

może wymieniać dane z otoczeniem za pomocą praktycznie dowolnego standardu sieci przemysłowej (Profibus, Profinet, FL-Net, DeviceNet, EthernetIP, Modbus TCP, CC Link itp.).

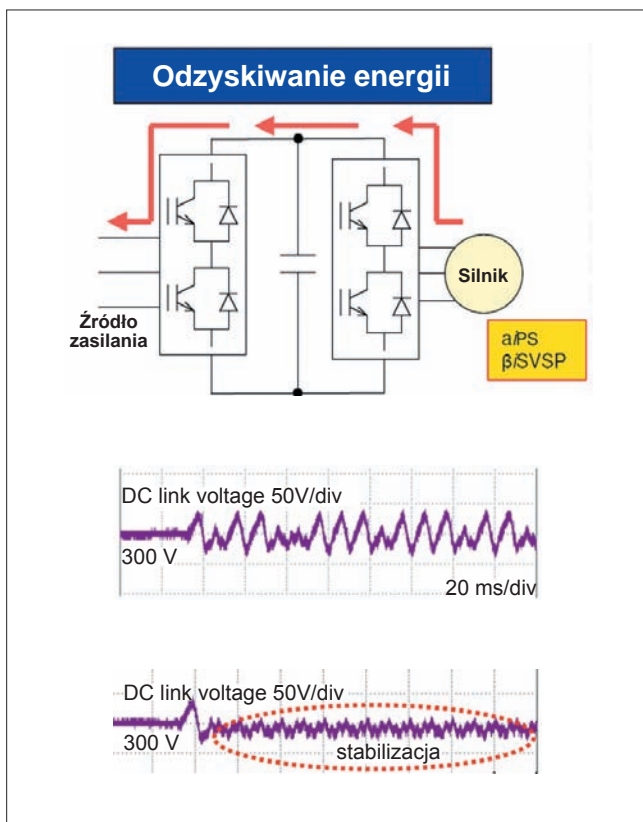
Firma oferuje zaawansowane oprogramowanie MT-LINKI do monitorowania stanu obrabiarki oraz udostępniania danych dla środowiska klasy MES lub ERP. Jest ono oparte na standardzie OPC (*OLE for process control*) do wymiany danych lub firmowym protokole FOCAS (*Fanuc open CNC API specification*). Oprogramowanie pozwala na monitorowanie kondycji nawet drobnych elementów wyposażenia obrabiarki.

Możliwe jest m.in. monitorowanie:

- prędkości obrotowej wentylatorów zasilaczy i sterownika NC (*preventive maintenance of fans*) – podczas pracy w trudnych warunkach następuje naturalne zanieczyszczenie powierzchni łopatek i zmniejszenie intensywności chłodzenia, co skutkuje pogorszeniem warunków termicznych, w jakich pracują elementy elektroniczne, i może być przyczyną awarii;
- stanu kondensatorów wygładzających w zasilaczach napędów osi – w miarę upływu czasu spada pojemność kondensatora (*capacity deterioration*), co jest skutkiem np. rozszczelnienia/wycieku (*leakage detection*), dlatego stale badana jest jego oporność (w warunkach normalnych, gdy kondensator jest sprawny, wartość oporu przekracza 100 MΩ) i w razie wykrycia uszkodzenia włącza się alarm.

W sterowniku uruchomiona jest cała gama programów monitorujących: SMART machine control – do automatycznej kompensacji luzu podczas cofania, SMART load meter – do obserwacji obciążenia wrzeciona w celu uzyskania większego zakresu rozwijanego momentu obrotowego, SMART thermal control – do unikania przegrzewania się napędu i wrzeciona.

Ponadto zasilacze napędów mają specjalną konstrukcję pozwalającą na zredukowanie ewentualnych czasów przestoju obrabiarki. Dotyczy to zwłaszcza szlifierek, ponieważ w ich przypadku możliwe jest odzyskanie części energii z rozprężonego wrzeciona (podczas hamowania) i przekazanie jej do napędu osi – nawet w razie awarii zasilania (rys. 4).



Rys. 4. Schemat ideowy zasilania z możliwością odzyskiwania energii (źródło: Fanuc)

Siemens

W tym przypadku uwagę zwracają rozbudowane systemy bezpieczeństwa występujące jako elementy standardowe w sterownikach NC oraz napędach osi. Spełniona jest norma DIN EN 61508, zgodnie z poziomem wymagań SIL2 i SIL3 w myśl normy DIN EO ISO 13849-1. Ciągłemu monitorowaniu podlegają: prędkość obrotowa wrzeciona, ruchy napędów osi oraz czas zatrzymania. Krok interpolacji osi jest wyliczany z wykorzystaniem liczb 80-bitowych, co pozwala na osiągnięcie bardzo dużej rozdzielczości – rzędu 0,001 nm. Dodatkowo wprowadzone algorytmy umożliwiają bardzo dokładne sterowanie w funkcji predykcji przyspieszenia (*feed forward*), przez co wyeliminowane zostaje ryzyko wystąpienia dużych wartości chwilowego przyspieszenia pogarszających dokładność pozycjonowania. Dzięki bardzo dużej mocy obliczeniowej zastosowanych procesorów tor ruchu narzędzia daje się przedstawić w postaci krzywych wykładniczych NURBS stopnia piątego – to oznacza, że jedynym ograniczeniem dokładności obróbki są parametry techniczne obrabiarki. Ponadto możliwa jest transformacja kinematyczna aż do pięciu osi (Traori) – zarówno w odniesieniu do tradycyjnej, szeregowej kinematyki, jak i robotów czy struktur równoległych. Parametry napędów poszczególnych osi ustawiane są automatycznie (*auto servo tuning*), aby uzyskać najlepsze reakcje dynamiczne i jednocześnie zachować wysoką dokładność pozycjonowania.

Ewentualna rozbudowa obrabiarki jest łatwa dzięki możliwości prostego i szybkiego dołączania do sterownika NC systemów transportu i mocowania – bez potrzeby głębokiej ingerencji w program PLC. Co ważne, w środowisku NC można instalować oprogramowanie pochodzące od niezależnych wytwórców – ma to duże znaczenie np. w przypadku uruchamiania dodatkowych narzędzi monitorowania.

Okuma

Oszczędność energii jest bardzo istotna, o czym świadczą wbudowane w sterowaniu funkcje dokładnego monitorowania mocy elektrycznej (w celu ograniczenia zużycia energii) dostarczanej do różnych urządzeń peryferyjnych (zasilaczy, urządzeń hydraulicznych, chłodzenia, transportu wiórów itp.). Według danych producenta miesięczna redukcja zużycia energii elektrycznej osiąga wartość 74% dla czasu postoju obrabiarki i 9% dla czasu pracy. Wygląd ekranu oszczędzania energii przedstawiono na rys. 5. System automatycznego doboru nastaw parametrów regulatorów serwonapędów posuwu (ServoNavi) w zależności od ciężaru przedmiotu obrabianego określa odpowiednie wartości posuwów, przyspieszeń itp., co pozwala na przyspieszanie ruchów w przypadku obróbki lekkich przedmiotów i uzyskanie stabilnego ruchu w przypadku przedmiotów o znacznej wadze.



Rys. 5. Ekran oszczędzania energii sterownika OSP-P300 (źródło: Okuma)

Dodatkowo w miarę zużywania się elementów łańcuchów kinematycznych (prowadnic, śrub pociągowych, przekładni tocznych itp.) możliwe jest automatyczne kompensowanie tych błędów w celu zachowania pierwotnej dokładności obrabiarki. Wyglądanie kształtu krzywej (Super-NURBS) polega na tym, że sterownik rozpoznaje istniejącą w programie obróbki sekwencję niewielkich ruchów (zazwyczaj dotyczy to obróbki wykończeniowej) i odpowiednio dobiera *on-line* wartości przyspieszenia/opóźnienia ruchów napędów posuwów. W efekcie znacznie polepsza się jakość obrabianej powierzchni, a jednocześnie zachowana jest założona geometria kształtu. Dynamiczna kontrola obciążenia narzędzia (DTLC – *dynamic tool load control*) powoduje zmianę wartości posuwu dla wyrównania obciążenia ostrza skrawającego w przypadku stosowania narzędzi wielostrzowych. Dzięki temu obróbka jest stabilniejsza i wydłuża się czas użytkowania narzędzia.

Optymalizacja warunków skrawania (*machining nav*) jest związana z wykrywaniem i eliminowaniem drgań samowzbudnych podczas obróbki poprzez zmianę wartości prędkości obrotowej wrzeciona. Również w tym przypadku wzrasta jakość obróbki i trwałość narzędzia.

Z myślą o obróbce na maszynach 5-osiowych zastosowano specjalną funkcję odpowiedzialną za utrzymanie kąta pochylenia narzędzia (TTC – *tool tilt compensation*). Dzięki wysłaniu do napędów sekwencji komend generowanych *on-line* przez NC utrzymana jest stała prędkość posuwu (nie występują typowe fluktuacje wartości przyspieszenia/opóźnienia), co skutkuje spokojniejszą obróbką i znacząco lepszą jakością (wyglądaniem) obrabianego konturu. Dodatkowo sterownik sam zmienia prędkość obrotową wrzeciona, aby nie dochodziło do powstawania drgań samowzbudnych.

Sterownik oferuje wiele udogodnień ważnych z punktu widzenia komfortu pracy operatora, np.: wspiera działania serwisowe, podaje terminy wymaganych przeglądów i czynności konserwacyjnych, analizuje podjęte działania. Podręczny techniczny kalkulator, wyposażony w graficzną bazę danych i materiały pomocnicze, umożliwia szybkie obliczenia lub przekształcenia parametrów skrawania. Edytor graficzny pozwala z kolei na sporządzenie odręcznych notatek lub prostych szkiców i przekazywanie ich operatorom pracującym na innych zmianach. Oprócz tradycyjnych elementów (takich jak: programy POT, cykle pomiarowe, edytory) w sterowniku są dostępne także listy kontrolne, informacje o realizowanym zamówieniu, interaktywne karty instrukcyjne, DTR i inne.

Bosch Rexroth

Według koncepcji tego producenta sterowniki NC powinny być jak najbardziej otwarte pod względem komunikacji informatycznej. Integratorzy mogą więc tworzyć swoje własne oprogramowanie w językach wysokiego poziomu i uruchamiać je w sterowniku. Dodatkowo w systemie zaimplementowano OPC server w standardzie UA oraz Web server – umożliwia to pełną integrację informatyczną i udostępnianie wszystkich danych powszechnie akceptowanymi metodami. Należy podkreślić, że programowanie sterownika jest realizowane za pomocą połączenia bezprzewodowego z urządzeniami klasy smart z uruchomionymi aplikacjami typu dotykowego i pełną symulacją 3D. Programowe interpolatory osiągają rozdzielczość kroku równą $0,1 \mu\text{m}$. Szybkość przetwarzania pętli programu PLC jest duża i wynosi $0,5 \text{ ms}$. Podobnie cykl pracy NC osiąga $0,25 \text{ ms}$. Wszelkie dane z czujników, napędów i układów pomiarowych, a także alarmy, ostrzeżenia oraz dane serwisowe są udostępniane poprzez sieć. Możliwa jest analiza wzajemnego powiązania pomiędzy komendami sterowania NC a stanem sygnałów PLC. Opcjonalnie oferowane jest oprogramowanie Generic Data Server gromadzące wszystkie informacje pochodzące z obrabiarki i udostępniające je za pomocą chmury (*cloud computing*).

Fagor

Firma zdecydowanie wspiera nowe technologie informatyczne. Z poziomu HMI (ekranu NC) można wysyłać wiadomości SMS oraz e-maile. Odczyt położenia osi odbywa się co $250 \mu\text{s}$. Stosowane są procesory 64-bitowe. Punkty profilu są interpretowane za pomocą krzywych spline trzeciego rzędu (Akima, NURBS itp.), co pozwala na bardzo dokładne odwzorowanie kształtu przedmiotu. Algorytmy generowania toru ruchu narzędzia wspierają technologię RTCP. Ta technika interpolacji bardzo się przydaje w pracach wykończeniowych, ponieważ pozwala na ciągłą kompensację położenia narzędzia podczas obróbki. Jest także efektywna w przypadku obróbki płaszczyzn nachylonych, w tym z kieszeniami, lub wykonywania ruchów obrotowych. Występuje tu adaptacyjne sterowanie posuwu i szybkości skrawania – tak by zminimalizować czas obróbki. Jako kryteria adaptacyjne brane są zatem pod uwagę moc chwilowa napędu wrzeciona czy temperatura wierzchołka narzędzia. Stosowana jest również przestrzenna kompensacja położenia wierzchołka narzędzia na podstawie znajomości jego aktualnego położenia oraz tabeli odkształceń termicznych obrabiarki.

Sterownik NC współpracuje z obrabiarkami o różnej kinematyce: szeregowej, równoległej, wrzecion sferycznych, obrotowych stołów itp. Operator ma dostęp do zintegrowanej, intuicyjnej dokumentacji poszczególnych funkcji programu POT i sterownika. Bardzo poważnie traktowane są kwestie poufności danych (opcja szyfrowania plików programów obróbki technologicznej w sterowniku NC).

Mitsubishi Electric

Najnowsze modele sterowników z serii M800 umożliwiają wielokanałowe i wielowłokowe sterowanie pracą nawet 255 osi (32 mogą pracować w interpolacji, 64 – jako wrzeciona). Maksymalnie można wydzielić 31 kanałów CNC, co oznacza, że pojedynczy sterownik jest w stanie obsłużyć kilka niezależnych obrabiarek. Widok pulpitu pokazano na rys. 6.

System wykonuje transformacje i interpolacje w czasie rzeczywistym. Umożliwia uruchomienie niezależnych osi CNC, NCI, PTP w tym samym kanale, a więc nadaje się do wieloosiowych, wielowrzecionowych maszyn specjalnych z rozbudowanymi magazynami narzędzi i innymi napędami, takimi jak podajniki czy podzielnice. Współpracuje z napędami cyfrowymi i analogowymi, przy czym można je dowolnie łączyć



Rys. 6. Ekran HMI sterownika Mitsubishi M800 (źródło: Mitsubishi)

(mieszać) bez dołączania dodatkowych interfejsów. Stosowane są zmienne wartości przyspieszenia i opóźnienia dla poszczególnych osi lub wrzecion, aby maksymalnie wykorzystać właściwości mechaniczne obrabiarki. Minimalizowane są czasy ustawcze, gdy nie odbywa się obróbka. Wspierane są funkcje MES – przez automatyczne wysyłanie danych pakietów informacji (o wykonanych przedmiotach, zużyciu energii, obciążeniu wrzeciona, wykorzystanych narzędziach, czasach, alarmach itp.) w standardzie SQL do bazy. Jako zewnętrzne nośniki programów występują karty pamięci SD (*secure digital*). Producent zadbał też o ergonomię pracy operatora – obsługa sterownika jest bardzo intuicyjna, porównywalna z obsługą popularnych smartfonów.

Hurco

Producent wykorzystał predykcyjne (wstępne) analizowanie programu obróbki technologicznej – tak aby można było zawczasu ustalić odpowiednią strategię działania napędów osi i wrzeciona (dobrać właściwe nastawy regulatorów). Analizie podlega wiele bloków programu – zazwyczaj ponad 1000. Do połączenia sterownika z przenośnym panelem operatora zastosowano szybkie, bezprzewodowe łącze w standardzie WiMAX (*worldwide interoperability for microwave access*) – operator może więc swobodnie się przemieszczać w otoczeniu obrabiarki. Do celów zdalnego serwisowania zainstalowano kamerę internetową w ekranie LCD operatora.

Fidia

Firma wykorzystwała nowe techniki interpolowania ruchów – zwłaszcza w przypadku elementów o skomplikowanych kształtach i niewielkich wymiarach, również wtedy, gdy do obróbki używane są narzędzia mocowane w głowicach o dwóch osiach obrotowych, oraz w przypadku kombinowanych układów kinematycznych z głowicami i stołami obrotowymi. W celu zminimalizowania błędów nieliniowości stosowana jest optymalizacja ruchu narzędzia (*RTCP – rotation tool center point*).

ANCA Motion

W sterownikach tej firmy wykorzystywane są najnowsze procesory Intel Core i7 oraz system Windows 8 Embedded jako środowisko operacyjne, w którym uruchomione jest właściwe oprogramowanie sterujące.

DMG Mori

Omawiana w tym miejscu platforma Celos (rys. 7) w zasadzie nie jest sterownikiem NC. Stanowi nakładkę programową (swego rodzaju HMI – jednolitą powierzchnię obsługową) współpracującą ze sterownikami firm Siemens i Mitsubishi. W zamyśle łączy w sobie warsztat i nadrzędne struktury przedsiębiorstwa, co pozwala na skomputeryzowanie obrób-

ki i w efekcie – na wyeliminowanie papierowej dokumentacji. Wszystkie odczyty z czujników są zachowywane w pamięci i analizowane, a w razie przekroczenia dopuszczalnych wartości generowane są odpowiednie komunikaty – analizator stanu obrabiarki (*APP condition analyser*). Możliwe jest ustalenie poziomów reakcji sterownika na sygnały z czujników: normalnego, podwyższonego i alarmowego.

W środowisku Celos uruchamiane są niezależne moduły odpowiedzialne za:

- optymalizację wykorzystania maszyny, procedury ustawcze,
- strukturalne gromadzenie danych i dokumentacji,
- obsługę nowych zamówień – harmonogramowanie,
- kontrolę stanu realizacji wykonywanej pracy,
- zarządzanie narzędziami (parametrami obróbki, offsetem itp.),
- zarządzanie paletami i systemem transportu przedmiotów,
- wsparcie obliczeń technologicznych parametrów obróbki, wielkości mierzonych, danych inżynierskich – kalkulator,
- bazy danych z dokumentacji technologicznej i konstrukcyjnej, tworzenie bibliotek i interaktywnych odsyłaczy do baz danych,
- wspieranie działań serwisowych i konserwacji obrabiarki (przez ostrzeżenia i komunikaty diagnostyczne, listy zamówień części zamiennych); dostępne jest także bezpośrednie połączenie z centrum serwisowym (możliwość analizy błędów *on-line*, wsparcia technicznego, zdalnego serwisowania),
- podgląd aktualnego stanu maszyny, obciążenie, alarmy, ostrzeżenia,
- automatyczne uruchamianie i wyłączanie obrabiarki.

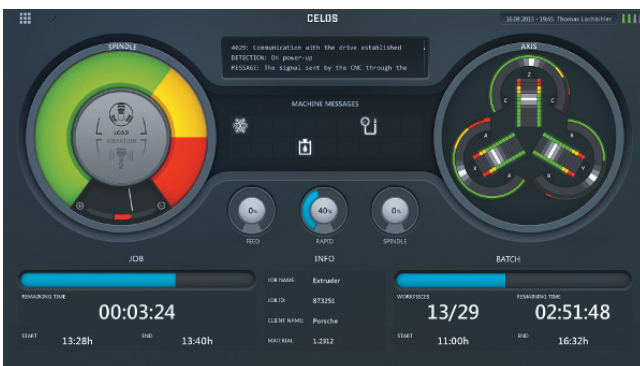
Dzięki zabudowanym w systemie Celos programowym interfejsom istnieje możliwość uruchamiania dowolnych programów (np. CAD/CAM, ERP) bezpośrednio na panelu operatora. Zapewniony jest także bezpośredni dostęp do zdalnych komputerów.

Powrót zapomnianego standardu

Efektom wprowadzenia koncepcji Industry 4.0 z pewnością będzie gwałtowny wzrost ilości informacji precyzyjnie opisujących wszystkie działania podejmowane podczas wytwarzania. Konieczne jest ich skuteczne przesyłanie pomiędzy obrabiarkami i maszynami technologicznymi, zwłaszcza że Industry 4.0 zakłada decentralizację i rozproszenie sterowania. Do zapewnienia sprawnej realizacji tego zadania można wykorzystać nieco zapomniany standard transmisji za pomocą światła w zakresie podczerwieni.

Nowo opracowane łącza umożliwiają uzyskanie przepustowości do 12,5 Gbit/s w bezpośredniej odległości (ok. 1 m) oraz do 1 Gbit/s przy dystansie 30 m. Dla porównania: powszechnie używany w dzisiejszych zakładach przemysłowych ethernet przewodowy pozwala na transmisję z przepustowością do 100 Mbit/s, a wersje bezprzewodowe (WiFi) – jedynie do 54 Mbit/s. Rozmiar nadajników nie jest duży – wynosi zaledwie 2 mm³, co pozwala na ich umieszczenie w niewielkich przestrzeniach (choćby w tradycyjnych wtyczkach/gniazdach sieci radiowych lub przewodowych). Współczynnik poprawności transmisji, który określa prawdopodobieństwo wystąpienia błędu i wyraża się bitową stopą błędów, jest bardzo korzystny i wynosi $2,5 \times 10^{-11}$.

Główne zalety omawianego standardu transmisji to: wykorzystywanie nieszkodliwego dla operatorów zakresu promieniowania elektromagnetycznego, możliwość stosowania zaawansowanych metod szyfrowania i mobilność. Stosowanie nadajników o niewielkiej mocy oraz ograniczony zakres propagacji sygnału zdecydowanie poprawiają bezpieczeństwo i poufność transmisji w porównaniu z tradycyjnymi sieciami bezprzewodowymi. Jeśli zapowiedzi producentów znajdą pokrycie w rzeczywistości, można się spodziewać coraz szerszego zastosowania sieci wykorzystujących ten standard transmisji. ■



Rys. 7. Przykładowy wygląd ekranu aplikacji Celos (źródło: DMG Mori)