

Rozmyta strategia sterowania adaptacyjnego posuwem dla zgrubnej obróbki tokarskiej

Roman Stryczek*, Wojciech Szczepka**

*Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji, ATH Bielsko-Biała

**Siemens Sp. z o.o. Industry Automation and Drive Technologies

Streszczenie: W artykule przedstawiono rozmyte podejście do automatycznej korekcy posuwu roboczego w trakcie zabiegu usuwania nadmiaru o dużej zmienności, zarówno co do objętości jak i miejscowej skrawalności. Zaprezentowane podejście nie wymaga instalacji w przestrzeni roboczej obrabiarki żadnych dodatkowych czujników pomiarowych. Wykorzystuje ono wyłącznie standardowe możliwości współczesnych układów sterowania numerycznego obrabiarkami. Na podstawie informacji o aktualnym rzeczywistym obciążeniu napędu głównego obrabiarki uaktywniana jest, poprzez akcję synchroniczną, nowa wartość programowego współczynnika korekcy posuwu. Dla jego określenia wykorzystuje się rozmyte funkcje agregacji. Metodę zilustrowano przykładowymi przebiegami regulacji, dotyczącymi zgrubnej obróbki zestawów kołowych.

Słowa kluczowe: sterowanie adaptacyjne, sterowanie rozmyte, akcje synchroniczne, bezpieczeństwo funkcjonalne

1. Wprowadzenie

W celu redukcji kosztów produkcji oraz zwiększeniu jej efektywności i niezawodności zachodzi konieczność dostosowania w czasie rzeczywistym (on-line) parametrów obróbki z uwzględnieniem „twardych” ograniczeń. Podstawowym kryterium optymalności dla zabiegów zgrubnej obróbki skrawaniem jest kryterium wydajnościowe. Określony nadatek należy usunąć w możliwie jak najkrótszym czasie, mając na względzie główne ograniczenia tego procesu, tj. wytrzymałość płytek skrawających oraz moc napędu głównego obrabiarki. Obecnie parametry skrawania dla obróbki realizowanej na obrabiarkach CNC, takie jak: posuw, głębokość czy szybkość skrawania są programowane off-line. W przypadku obróbki zgrubnej, gdy nadatek wykazuje dużą zmienność co do objętości i skrawalności, ich optymalizacja off-line jest bardzo trudna lub wręcz niemożliwa. To powoduje, że osoba określająca wartości parametrów skrawania, postępując asekuracyjnie, dobiera bardzo zachowawcze wartości parametrów, zazwyczaj znacznie zaniżone, odpowiadające najbardziej niekorzystnym, spodziewanym warunkom obróbki. W ten sposób nie wykorzystuje się mocy obrabiarki i możliwości skrawnych narzędzia, co w konsekwencji powoduje wydłużenie czasu operacji. Istnieją co prawda możliwości ręcznej korekcy posuwu i szybkości obrotowej. Wymaga to jednak odpowiednich kwalifikacji i doświadczenia operatora obrabiarki i jego stałego zaangażowania podczas zabiegu skrawania, co eliminuje jednak możliwość jego pracy wielostanowiskowej.

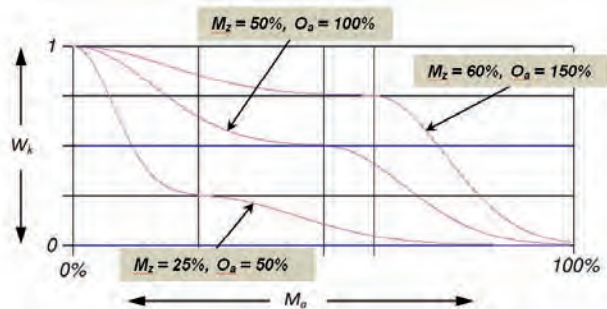
Automatyzacja zabiegów obróbki zgrubnej wymaga aplikacji sterowania adaptacyjnego na danym stanowisku. Sterowanie adaptacyjne jest metodą osiągnięcia optymalnych i bezpiecznych warunków obróbki. Tradycyjne podejście do zagadnienia sterowania adaptacyjnego jest kojarzone z zabudowaniem w układ OUPN (Obrabiarka-Uchwyt-Przedmiot-Narzędzie) czujników siły, odkształceń, naprężeń, temperatury, emisji cieplnej, drgań, emisji akustycznej itp.



Rys. 1. Przebieg momentu obrotowego i mocy silnika napędu
Fig. 1. Torque and Power characteristics of main spindle drive

Tego typu rozwiązanie jest zazwyczaj kosztowne, rozbudowujące układ OUPN, wymagające wysokokwalifikowanej obsługi dla kalibracji układu regulacji, często także wymagające zainstalowania zewnętrznego komputera PC i odpowiednich protokołów komunikacyjnych dla realizacji strategii regulacji. W wielu przypadkach rozbudowa układu OUPN jest technicznie niemożliwa lub nieopłacalna. Dlatego idea sterowania adaptacyjnego (AC) obrabiarkami CNC, popularyzowana już od lat 60. XX wieku, nie znalazła w praktyce odpowiednio szerokiego zastosowania. Często badane i publikowane podejścia nie wychodziły poza etap prób laboratoryjnych. Przełomem w zakresie powszechnego stosowania AC mogą stać się nowe generacje układów sterowania numerycznego, pozwalające na bezinwestycyjne aplikacje, dzięki wykorzystaniu bezpośrednich informacji o obciążeniu układów napędowych obrabiarki. Wbudowane funkcje śledzenia (*servo-trace*) różnych parametrów pracy napędów, ułatwiają operatorowi zapoznanie się z ich wielkością i zmiennością. Równocześnie operator (programista) ma dostęp do wielu zmiennych systemowych, na które może wpływać w programie przez akcje synchroniczne. Te nowe, coraz częściej standardowe możliwości sprzętu, plus inteligentne strategie modyfikacji parametrów obróbki, umożliwiając elastyczną reakcję obrabiarki na zmieniające się warunki obróbki.

Wykresy składają się z dwóch części, dla: $M_a < M_z$ i $M_a > M_z$. W każdym z przedziałów zastosowano funkcję logistyczną. W punkcie $M_a = M_z$ wykresy są spójne.

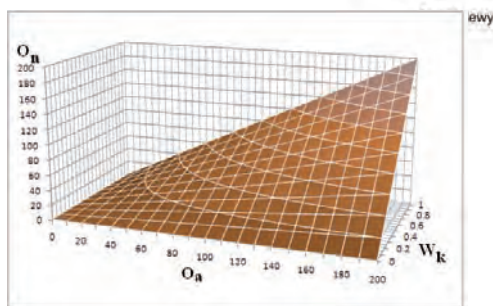


Rys. 3. Przebiegi odwzorowujące współczynnik korekcji posuwu W_k

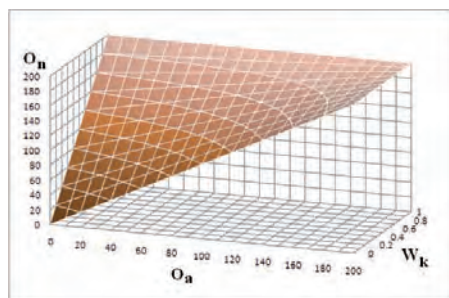
Fig. 3. Curves of the Feed W_k correction coefficient

W drugim etapie odwzorowania użyto miękkich funkcji agregacji dla zbiorów rozmytych w celu określenia nowego programowego korektora posuwu O_n . Dla przypadku $M_a > M_z$ zastosowano miękkie iloczyn algebraiczny zmniejszający posuw (rys. 4), natomiast przypadku $M_a < M_z$ zastosowano miękką sumę algebraiczną zwiększającą posuw (rys. 5):

- dla $M_a > M_z \rightarrow O_n = O_a W_k$,
- dla $M_a < M_z \rightarrow O_n = 200(O_a/200 + W_k - (O_a/200) W_k)$.



Rys. 4. Funkcja agregacji – miękki iloczyn
Fig. 4. Aggregation function – soft product



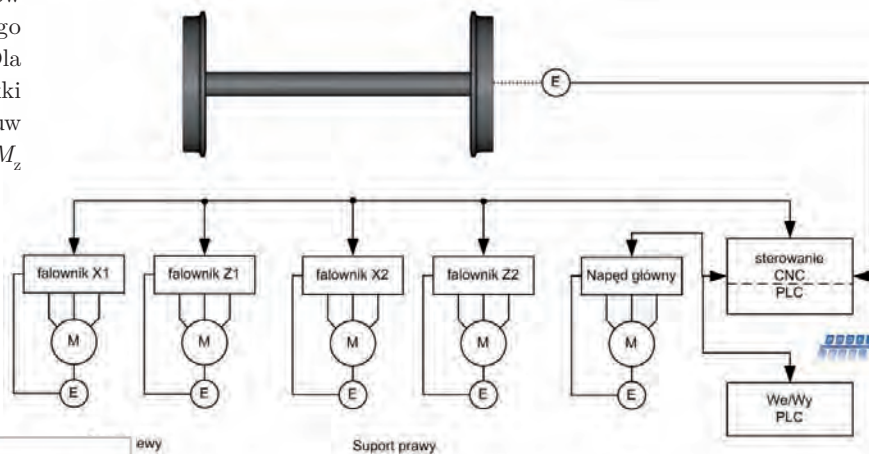
Rys. 5. Funkcja agregacji – miękka suma
Fig. 5. Aggregation function – soft sum

Dla tych dwóch przypadków zaprojektowano dwie równolegle sprawdzane, sparametryzowane akcje synchroniczne. Warunkiem wykonania każdej z nich jest minimalna informacja z PLC o aktywacji przez operatora funkcji sterowania adaptacyjnego. Operator powinien mieć możliwość wyłączenia funkcji sterowania adaptacyjnego, ponieważ w niektórych przejściach wykańczających może być ona niepożądana. Aktywacją funkcji AC można oczywiście także sterować programowo.

3. Struktura systemu sterowania

Zadaniem systemu sterowania obrabiarką jest realizacja wszystkich funkcji maszynowych i technologicznych. System sterowania można podzielić na moduły:

1. moduł CNC – realizuje funkcje technologiczne,
2. moduł PLC – realizuje maszynowe funkcje logiczne,
3. moduł napędowy realizuje ruch narzędzia (silniki serwo i napęd główny),
4. podsystem bezpieczeństwa – realizuje funkcje bezpieczeństwa w maszynie, jest on oparty o moduły CNC i PLC.



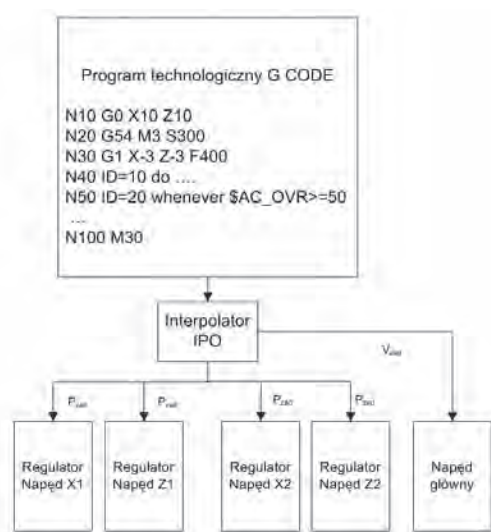
Rys. 6. Struktura systemu sterowania
Fig. 6. Structure of the system control

Na rys. 6 przedstawiono strukturę systemu sterowania oraz magistralę PROFIBUS wykorzystywaną do komunikacji z napędem wrzeciona oraz układami we/wy.

Zadaniem CNC jest przetwarzanie programu technologicznego, który zawiera zaprogramowany tor ruchu narzędzia oraz realizuje wszystkie dodatkowe funkcje technologiczne. Sterowanie CNC na podstawie programu technologicznego wylicza zadaną wartość prędkości i położenia dla poszczególnych napędów osi. Sterowanie CNC w szczególności odpowiedzialne jest za funkcje pomiarowe. Funkcje pomiarowe korzystają z analogowo-cyfrowych przetworników. Wielkością mierzoną w prezentowanym przykładzie jest analogowy sygnał napięciowy laserowych czujników odległości. Proces pomiaru polega na pomiarze napięcia wyjściowego z czujnika laserowego, napięcie jest proporcjonalne do aktualnej odległości mierzonej powierzchni od nadajnika lasera. System sterowania automatycznie skaluje mierzoną wartość napięcia. Zmierzona wartość jest przetwarzana w programie technologicznym.

System sterowania pracuje z częstotliwością zegara IPO. Obrazowo mówiąc, cykl pracy regulatora IPO polega na każdorazowym wyznaczaniu kolejnego kroku położenia narzędzia na obrabiarce w przestrzeni maszyny. Operacja jest realizowana przy znanych punktach początku i końca toru ruchu narzędzia, poprawkach kompensacyjnych wynikających z promienia zaokrąglenia ostrza narzędzia, wreszcie znane są prędkości posuwu oraz przyspieszenia ruchu narzędzia. Ponieważ narzędzie wykonuje skomplikowane ruchy to do ich realizacji potrzebne jest kilka napędów. Regulator IPO oblicza parametry ruchu dla każdej osi sterującej położeniem narzędzia obróbczego. Typowe czasy przetwarzania IPO dla wysokowydajnych obrabiarek to 1–10 ms.

Schemat blokowy działania regulatora IPO przedstawiono na rys. 7. Operacja toczenia zakłada ciągle wyliczanie prędkości posuwu osi na podstawie prędkości obrotowej obra-



Rys. 7. Struktura regulacji CNC IPO
Fig. 7. IPO CNC control structure

bianego przedmiotu (V_{zad}). Zadane współrzędne początku i końca ruchu odczytywane są z programu technologicznego i rzutowane na poszczególne składowe ruchu w osiach X i Z (P_{zad}). W programie umieszczone są funkcje pomiarowe oparte o tzw. Akcje synchroniczne – współbieżnie przetwarzane funkcje matematyczne i komunikacyjne.

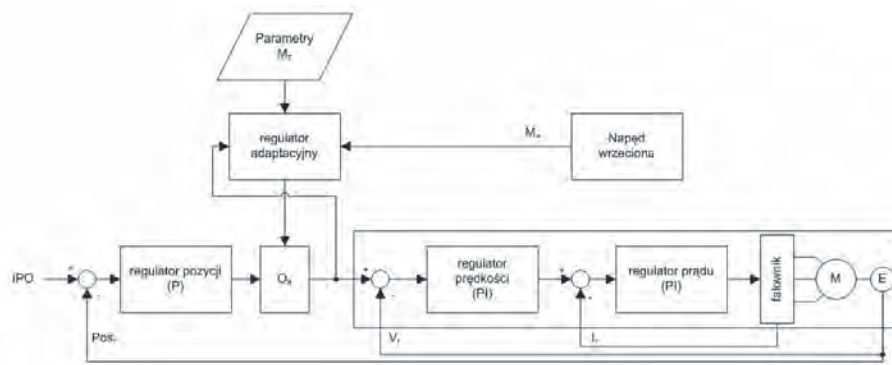
Do komunikacji układu CNC z napędami posuwu wykorzystywana jest synchroniczna magistrala komunikacyjna o przepustowości 64 Mb/s. Napęd główny sterujący silnikiem asynchronicznym do napędu pomp hydraulicznych komunikuje się za pomocą magistrali PROFIBUS z szybkością 12 Mb/s.

Zadaniem modułu PLC jest obsługa wszystkich funkcji maszyny oparta na rejestracji sygnałów wejściowych z różnych urządzeń wejściowych (wyłączniki krańcowe, ciśnieniowe sygnały CNC itp.), przetwarzanie sygnałów zgodnie

z programem logicznym PLC oraz sterowanie urządzeniami wyjściowymi (styczniki, silniki, zawory ciśnieniowe). Procesor PLC jest układem niezależnym funkcjonalnie od CNC. Oba układy posiadają możliwość komunikacji. Do zbierania informacji z czujników i we/wy wykorzystywana jest sieć przemysłowa PROFIBUS. Do komunikacji z użytkownikiem stosowany jest specjalny HMI w postaci ekranu dotykowego.

Moduł napędowy składa się z czterech napędów posuwu z rodziny Simodrive 611D, dla napędu dwóch współbieżnie pracujących suportów krzyżowych. Do napędzania śrub kulowych zastosowano silniki synchroniczne z wbudowanym systemem pomiaru położenia. Silniki te są wyposażone w absolutny system pomiaru położenia EnDat. Pozwala on na zapamiętanie pozycji przez sterowanie po wyłączeniu napięcia zasilania. Taki system pomiaru pozwala skrócić czas przygotowania maszyny do pracy oraz zwiększa bezawaryjność. Układ napędowy posuwu jest układem wielonapędowym. Przekształtniki każdej z osi zasilane są ze wspólnej szyny napięciowej 600 V DC. Napięcie zasilania przekształtników jest stabilizowane. Dodatkowo dla uzyskania wysokiej dynamiki pracy napędów posuwu zasilacz układu napędowego może pracować w trybie generatorowym. Tryb generatorowy pracy pozwala zwrócić nadmiar energii do sieci zasilającej. Układ napędowy można rozbudować o dodatkową funkcję bezpieczeństwa, która pozwala na awaryjny odskok narzędzia w momencie zaniku napięcia zasilania.

Do zasilania silnika napędu głównego zastosowano napęd Sinamics S120 AC Blocksize. Silnik asynchroniczny o mocy 30 KW ma stałą charakterystykę mocy w zakresie 500–2000 obr./min. Na uwagę zasługuje sterowanie napędem wrzeciona głównego, które odbywa się za pomocą sterownika PLC z użyciem protokołu komunikacji dla napędów Profidrive. Silnik napędu głównego napędza wysokowydajne pompy hydrauliczne. Układ dwóch par silników hydraulicznych przenosi moment obrotowy na koła obrabianego zestawu. Układ napędowy w połączeniu z systemem sterowania CNC tworzy kaskadowy układ regulacji położenia i prędkości.



Rys. 8. Schemat blokowy układu regulacji adaptacyjnej dla jednej osi posuwu
Fig. 8. Schematic diagram of the adaptive control loop for single feed axis

Wyjście regulatora pozycji (P) zostało podłączone do elementu proporcjonalnego O_a (rys. 8). Gdy regulacja adaptacyjna jest wyłączona, aktualny programowy korektor posuwu O_a przyjmuje na stałe wartość 1 (100 %). Operator może włączyć tryb regulacji adaptacyjnej za pomocą przycisku na pulpicie sterowania maszyny. Po włączeniu, regu-

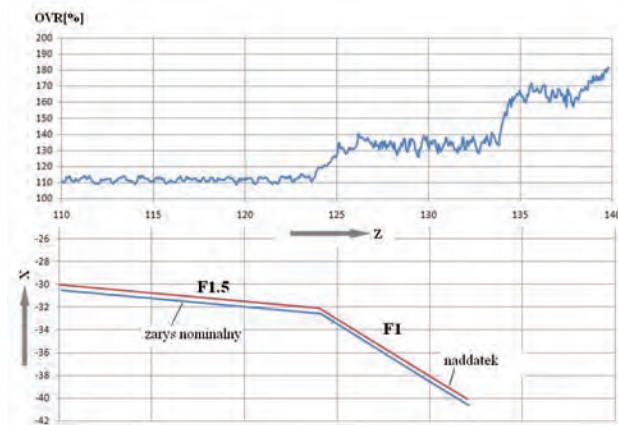
lator adaptacyjny, przez zmienną systemową O_a modyfikuje wartość zadaną dla regulatora prędkości. W obu układach regulacji prędkości i położenia, jako wartość pomiarową wykorzystuje się odpowiednio sygnał położenia (P_{osr}) i prędkości (V_p) z wbudowanego w silnik (M) systemu pomiarowego (E). Wielkość mierzona M_a i zadana M_z są parametrami wejściowymi dla regulatora adaptacyjnego. Parametry regulatorów pozycji (P), prędkości (V) i prądu (I) są dobrane w optymalny sposób tak, aby osiągnąć maksymalną dynamikę serwomechanizmu. Dla uzyskania optymalnej jakości regulacji ważne jest bezluzowe wykonanie zespołu mechanicznego suportu wraz ze śrubą kulową. Regulator adaptacyjny pracuje z częstotliwością interpolatora IPO.

4. Próby warsztatowe

Próby przemysłowe dotyczyły zgrubnej obróbki obręczy kół kolejowych. Obróbkę taką cechuje duża zmienność naddatku obróbkowego zarówno wzdłuż trajektorii ruchu narzędzia jak i wynikająca z bicia promieniowego obrabianych powierzchni. Przebiegi czasowe zmiennej sterowanej $\$AC_OVR$ (rys. 9 i 10) mogły być śledzone i archiwizowane dzięki wbudowanej w USN Sinumerik funkcji TRACE. Przedstawiona strategia zmiany posuwu przyniosła bardzo pozytywne rezultaty. Skrócenie czasu zgrubnego przejścia dla obróbki zestawu kołowego dochodziło w niektórych próbach do 45 % w stosunku do czasów nominalnych. Dodatkowe korzyści to ochrona narzędzia przed katastroficznym zużyciem ostrza, bardziej korzystna i ustabilizowana postać wióra, możliwość ograniczenia liczby przejść zgrubnych, blisko dwukrotne skrócenie czasu dobiegu i wybiegu narzędzia oraz dużo większy komfort pracy operatora obrabiarki, który może w trakcie obróbki skoncentrować się na innych czynnościach obsługowych.

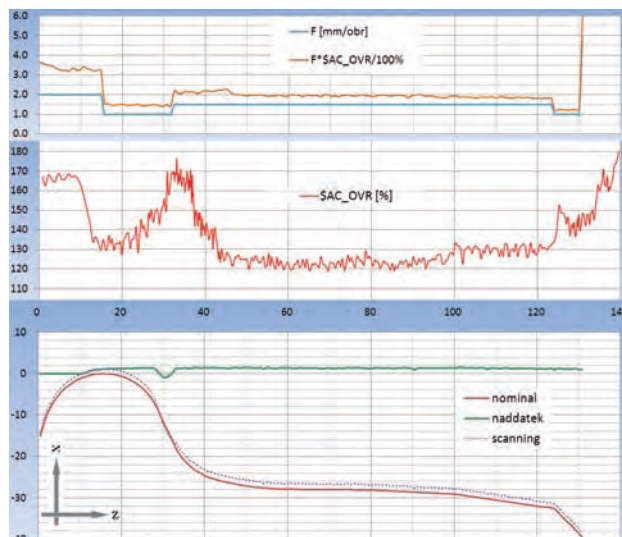
Na rys. 9 przedstawiono kształtowanie się zmiennej sterowanej podczas rozpoczynania obróbki oraz po zmianie posuwu zaprogramowanego dla przedmiotu o stałym nadatku na kolejnych powierzchniach. Można zauważyć wyraźny spadek programowej korekty posuwu po zwiększeniu posuwu zadanego o 50 %.

Rys. 10 obrazuje przebiegi dla pełnego przejścia z nierównomiernie rozłożonym nadatkiem. Nadatek obróbkowy



Rys. 9. Kształtowanie się zmiennej sterowanej przy stałym nadatku i zmiennym posuwie

Fig. 9. Formation of a controlled variable at constant of allowance and variable feed rate



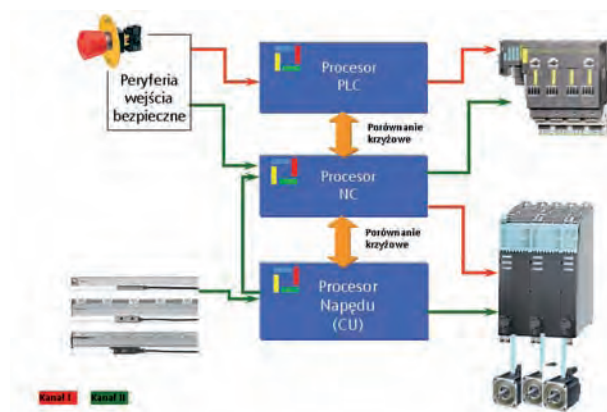
Rys. 10. Wykresy kształtowania się nadatku, zmiennej sterowanej $\$AC_OVR$, posuwu zadanego i posuwu rzeczywistego.

Fig. 10. Graph of allowance, controlled variable $\$AC_OVR$, setpoint feed rate and actual real feed

określono przez bezdotykowe zeskanowanie profilu laserowym czujnikiem pomiarowym. Na wykresie można zauważyć znaczny wzrost (o ok. 50 %) korekty posuwu w momencie skrawania krótkiego odcinka pozbawionego nadatku obróbkowego. Chwilowe wahania zmiennej sterowanej były spowodowane także znacznym biciem promieniowym zestawu kołowego.

5. Funkcje bezpieczeństwa

Jednym z najważniejszych systemów w układzie sterowania jest system bezpieczeństwa. System realizuje wymagania w zakresie ochrony obrabianego przedmiotu, maszyny oraz operatora. Dyrektywa Maszynowa WE 2006/42/EC nakłada na producenta wymóg produkcji bezpiecznej maszyny zgodnie z przyjętymi standardami. Wszystkie maszyny produkowane lub wprowadzane na rynek Wspólnoty Europejskiej muszą być zgodne z Dyrektywą Maszynową. Idea pracy systemu bezpieczeństwa polega na zapewnianiu z możliwie



Rys. 11. Wzajemne porównywanie sygnałów funkcji bezpieczeństwa

Fig. 11. Mutual comparison of safety function signals

wysokim prawdopodobieństwem funkcji bezpieczeństwa. W układzie sterowania zostały użyte następujące funkcje:

- odcięcie energii,
- zatrzymanie awaryjne,
- sterowanie logiczną pracą rygla drzwi osłony operatora,
- ograniczenie prędkości dla napędów.

Układ sterowania bezpieczeństwem został zaprojektowany i wykonany tak, aby spełniać kategorię PL=c zgodnie z wymaganiami normy ISO 13849-1-2. Cała instalacja elektryczna została zaprojektowana i wykonana zgodnie z PN-EN 60204-1:2010. Na uwagę zasługuje w szczególności sposób realizacji sterowania logicznego. Spełnienie postulatu wysokiej niezawodności zostało osiągnięte poprzez redundancję (nadmiarowość) we wszystkich elementach układu sterowania funkcji bezpieczeństwa. Zastosowano dwustopniowe, certyfikowane wyłączniki krańcowe, oraz wyłączniki awaryjne. Urządzenia wykonawcze (na przykład rygiel osłony operatora) sterowane są za pomocą dwóch szeregowo połączonych przekaźników. Transmisja sygnałów sterujących odbywa się z wykorzystaniem bezpiecznego protokołu transmisji danych (PROFISAFE). Wieloprocesorowe układy logiki i nadzoru są dodatkowo testowane co najmniej raz w ciągu 8 h pracy maszyny.

6. Podsumowanie

Potencjalne możliwości sterowania adaptacyjnego mogą być uwolnione przez zastosowanie metod programowych, bezinwestycyjnych i zarazem przyjaznych operatorowi obrabiarki. W pracy przedstawiono skuteczną metodę zmiany posuwu w trakcie realizacji zabiegu toczenia zgrubnego. Parametry dwuetapowego odwzorowania zmiennych wejściowych na programowy korektor posuwu można łatwo dostosować do innych metod obróbki. Opracowana metoda posługuje się spójnymi, gładkimi funkcjami rozmytej agregacji zmiennych wejściowych, co upodabnia jej efekty do inteligentnego działania operatora. Równocześnie zaproponowana metoda nie ogranicza wpływu operatora na przebieg obróbki, gdyż zastosowane akcje synchroniczne umożliwiają w dowolnym momencie na zmianę zadanej wartości momentu obrotowego lub wręcz wyłączenie automatycznej korekcji posuwu i przejście w tryb ręcznej korekcji posuwu.

Bibliografia

1. Jemielniak K.: *Commercial tool condition monitoring systems*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 15(1999), 711–721.
2. Matsubara A., Ibaraki A.: *Monitoring and control of cutting forces in machining process: a review*. International Journal of Automation Technology 3(2009)4, 445–456.
3. Yan MT.: *An adaptive control system with self-organizing fuzzy sliding mode control strategy for micro wire-EDM machines*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 50(2010) 315–328.
4. Bok L. B.: *Adaptive control software for turning*. Modern Machine Shop, 6(2004).

5. Ivester R.W., Heigel J.C.: *Smart machining systems: Robust optimization and adaptive control optimization for turning operation*. Transactions of NAMRI/SME 35(2007) 505–512.
6. *Method and system for adaptive control of turning operations*. US Patent 6476575, 2002.
7. Nenov G. V., Szécsi T.: *Increasing CNC machine tool productivity by using tool-part touch control*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 18(2002) 291–296.
8. Zuperl U., Cus F., Milfelner M.: *Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling*. Journal of Materials Processing Technology 164–165 (2005), 1472–1478.
9. Liu Y., Cheng T., Zuo L.: *Adaptive control constraint of machining processes*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 17(2001) 720–726. ■

A fuzzy control strategy for an adaptive feed rate control during rough turning

Abstract: This paper presents a fuzzy approach to automatic feed rate correction during rough turning with inconstancy both depth of cut and machinability of material. Additional sensors are not required in this approach. It exploits strictly the ability of modern numerical controllers. Based on actual power consumption, through synchronous actions, is a new adaptive value of feed rate activated. An aggregate fuzzy functions has been used to adaptive value of feed rate evaluation. An illustrative example of wheels machining has been used to demonstrate effects of proposed methods.

Keywords: adaptive feed rate control, fuzzy control, synchronous actions, functional safety

dr hab. inż. Roman Stryczek

Adiunkt w Katedrze Technologii Maszyn i Automatyzacji Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Specjalista w zakresie komputerowego wspomaganie projektowania procesów i operacji wytwórczych, obrabiarek sterowanych numerycznie, elastycznego programowania obrabiarek, sieci Petri oraz metod sztucznej inteligencji w wytwarzaniu maszyn. Bogate doświadczenie w zakresie współpracy z przemysłem.

e-mail: rstryczek@ath.bielsko.pl

mgr inż. Wojciech Szczepka

Absolwent Politechniki Śląskiej, Wydziału Automatyki Elektroniki i Informatyki na specjalności Komputerowe Systemy Sterowania. Obecnie pracuje w firmie Siemens Sp z o.o. w Bielsku-Białej. W ramach pracy zawodowej zajmuje się systemami sterowania numerycznego CNC. Działa w Komitecie Technicznym przy PKN, zajmuje się bezpieczeństwem funkcjonalnym.

e-mail: wojciech.szczepka@siemens.com

