

# Elastyczny układ sterowania CNC maszyn bazujący na PC

## Flexible PC-based CNC machine control system

MARCIN PAPROCKI  
ANDRZEJ WAWRZAK  
KRYSTIAN ERWIŃSKI  
MAREK KŁOSOWIAK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.4.46>

Prezentowany układ sterowania numerycznego maszyn oparty na komputerze PC, komunikujący się z serwonapędami oraz pomocniczymi układami wejścia i wyjścia poprzez magistralę komunikacyjną EtherCAT. Komputer wyposażono w system operacyjny czasu rzeczywistego Linux RTAI oraz zmodernizowane oprogramowanie sterujące LinuxCNC. Opracowano programowy moduł komunikacyjny magistrali EtherCAT i zintegrowano go z oprogramowaniem LinuxCNC. Przytoczono wyniki badań, ilustrujące możliwości układu sterowania w zakresie wygładzania trajektorii, a także wyniki badań błędów nadążania, przeprowadzonych na stanowisku z modułem ruchu liniowego z serwonapędem PMSM. Zestawiono podstawowe parametry serwonapędu dotyczące możliwości dynamicznych i precyzyjnego pozycjonowania, osiągnięte na stanowisku ruchu liniowego. Omówiony w artykule układ sterowania numerycznego maszyn został wdrożony w maszynie trzyosiowej.

**SŁOWA KLUCZOWE:** układ sterowania CNC, otwarty układ sterowania, system operacyjny czasu rzeczywistego, Linux RTAI, LinuxCNC, EtherCAT

*In the article a PC-based CNC machine control system is presented which communicates with servo drives and auxiliary input/output devices via EtherCAT bus. LinuxRTAI real-time operating system and LinuxCNC control software were implemented in the PC controller. A software module implementing EtherCAT communication with the servo drives was developed and integrated with LinuxCNC. Experimental results were presented which show the trajectory smoothing capabilities of the control system. Experimental results were also presented that show following errors obtained by running an example trajectory on a linear motion module. Basic parameters that show the control systems capabilities obtained during the experimental tests have been presented. The CNC control system presented in this article was implemented on a 3-axis machine.*

**KEYWORDS:** CNC control system, open control system, real time operating system, Linux RTAI, LinuxCNC, EtherCAT

Układy sterowania CNC maszyn dzieli się na układy sterowania zamknięte, uniemożliwiające modyfikację architektury układu, i układy otwarte, łatwe w konfiguracji, które da się adaptować do różnych maszyn [1]. Układy otwarte często bazują na komputerach przemysłowych IPC (*industrial personal computers*) z oprogramowaniem CNC i coraz częściej są stosowane do sterowania wieloma maszynami. W zależności od producenta w układach tych występują różne magistrale komunikacyjne, przy czym najpopularniejsze są magistrale jednokierunkowe – jak do sterowania napędami skokowymi – wysyłające sygnały CLK, DIR, ENABLE.

\* Dr inż. Marcin Paprocki (zwirek@fizyka.umk.pl), mgr inż. Andrzej Wawrzak (awawrzak@fizyka.umk.pl), dr inż. Krystian Erwiński (erwin@fizyka.umk.pl) – Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu; mgr inż. Marek Kłosowiak (m.klosowiak@obrusn.pl) – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów (PIAP) w Warszawie, Oddział Badawczo-Rozwojowy Urządzeń Sterowania Napędów w Toruniu

Bardzo zaawansowane układy sterowania numerycznego maszyn, oparte na komputerach IPC, produkuje firma Beckhoff Automation GmbH [2]. Są one sterowane z wbudowanego sterownika PC ze zintegrowanymi wejściami i wyjściami (*embedded PCs*) lub z przemysłowego wielordzeniowego komputera PC. Jako programu sterującego używa się TwinCAT CNC [3]. Komunikacja pomiędzy komputerem IPC (stanowiącym sterownik CNC) a serwonapędami oraz układami wejścia i wyjścia – zarówno dyskretnymi, jak i analogowymi – jest realizowana przez magistralę EtherCAT [4], zgodną z normą IEC 61158. Warstwy fizyczna i liniowa są zgodne ze standardem typowej ramki Ethernet IEEE 802.3. Dzięki temu możliwe jest podłączenie serwonapędów oraz układów wejścia i wyjścia za pośrednictwem typowych przewodów ethernetowych do portu komputera PC. W warstwie aplikacyjnej stosu tej magistrali zastosowano protokół komunikacyjny CANopen [5]. Na rynku oferowanych jest wiele serwonapędów wyposażonych w porty ethernetowe z protokołem komunikacyjnym CANopen. Magistrala doskonale nadaje się do komunikacji komputera z napędami w czasie rzeczywistym. Obsługa wszystkich serwonapędów, tj. wysyłanie danych oraz ich odczyt z serwonapędów i układów wejścia/wyjścia, odbywa się cyklicznie w jednej przesyłanej ramce ethernetowej.

Jednym z rozwiązań układów sterowania numerycznego maszyn są układy sterowania oparte na komputerach IPC z oprogramowaniem LinuxCNC [6], pracujące w środowisku Linux w czasie rzeczywistym i wyposażone w magistralę komunikacyjną EtherCAT. Jest to rozwiązanie tanie, lecz o dużych możliwościach adaptacji do sterowania różnie skonfigurowanymi maszynami.

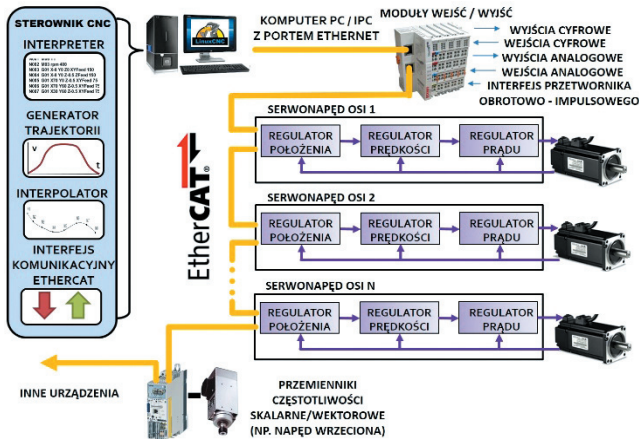
Z uwagi na niski koszt oraz duże możliwości w zakresie programowania układy sterowania bazujące na komputerach IPC oraz magistralach EtherCAT są dobrą alternatywą dla układów zamkniętych.

### Architektura układu sterowania

W przedmiotowym układzie sterowania sterownikiem nadrzędnym jest komputer PC z systemem operacyjnym Linux RTAI (*real time application interface*) i programem sterującym LinuxCNC. Sterownik steruje serwonapędami poszczególnych osi mechanicznych oraz pomocniczymi urządzeniami automatyki (takimi jak przemiennik częstotliwości, wejścia i wyjścia). Wszystkie podzespoły układu sterowania komunikują się między sobą poprzez magistralę EtherCAT. Na rys. 1 przedstawiono budowę układu sterowania.

Komputer sterujący jest typowym komputerem PC z procesorem Intel Core i3 (dwurdzeniowym) z portem komunikacyjnym Ethernet. Zaleca się stosowanie komputerów PC lub IPC z procesorami Intel Core i3, i5 lub i7 oraz dyskami SSD. Standardowo przewiduje się dziewięć osi numerycznych, choć istnieje możliwość zwiększenia ich liczby. Wejść i wyjść może być bardzo wiele (nawet

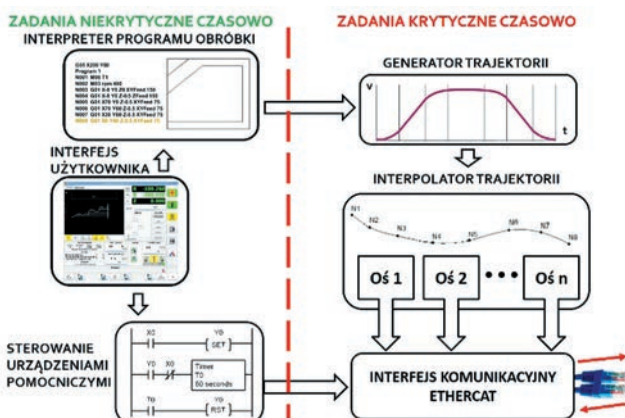
kilkaset). W jednej ramce EtherCAT przesyłanych jest do 1500 B informacji, które służą do obsługi serwonapędów, układów wejścia i wyjścia oraz innych napędów. Serwonapędy osi nie muszą pochodzić od jednego producenta – ważne, by miały port Ethernet ze stosem komunikacyjnym EtherCAT i protokołem komunikacyjnym CANopen. Jako moduły układów wejścia i wyjścia dyskretnego i analogowego oraz moduły do obsługi linii pomiarowych (przetworników obrotowo-impulsowych) zastosowano produkty firmy Beckhoff. W opracowanym układzie sterowania kolejne ramki komunikacji EtherCAT przesyłane są cyklicznie co 1 ms.



Rys. 1. Budowa układu sterowania

## Program sterujący CNC

Komputer sterujący układem sterowania wyposażono w program sterujący LinuxCNC, działający w środowisku Linux RTAI [7], które umożliwia realizację zadań czasowo krytycznych w czasie rzeczywistym. Linux RTAI zawiera standardowe jądro systemu operacyjnego Linux oraz mikrojądro czasu rzeczywistego. Mikrojądro czasu rzeczywistego realizuje niewielką liczbę zadań deterministycznych programu CNC i ma bezpośredni dostęp do przerwań sprzętowych czy zegarowych. Zadania czasu rzeczywistego mają najwyższy priorytet. Jądro Linux wykonuje pozostałe zadania niekrytyczne czasowo, gdy żadne z zadań czasu rzeczywistego nie jest realizowane. Na rys. 2 przedstawiono moduły programu LinuxCNC, których realizacja jest niekrytyczna czasowo, oraz zadania deterministyczne, realizowane cyklicznie w ściśle określonych odcinkach czasu.



Rys. 2. Podział zadań programu CNC na niekrytyczne czasowo oraz deterministyczne, realizowane w ściśle określonych odcinkach czasu

Program LinuxCNC dzieli się na część aplikacyjną i warstwę abstrakcji sprzętowej HAL (*hardware abstraction layer*). Część aplikacyjna obejmuje: nadrzędny program ładujący moduły składowe programu CNC wraz z plikami konfiguracyjnymi, graficzny interfejs użytkownika GUI (*graphical user interface*), interpreter G-kodów programu użytkownika oraz moduł sterowania wejściami i wyjściami pomocniczymi maszyny. Istnieje możliwość dodawania własnych modułów sterujących elementami maszyny oraz tworzenia własnych interfejsów GUI (lub wybrania ich z kilku dostępnych w programie LinuxCNC). W ramach GUI istnieje opcja wyświetlania wybranych wyników pomiarów czy skorzystania z wirtualnego oscyloskopu. Część aplikacyjna programu nie jest krytyczna czasowo. Z kolei warstwa sprzętowa HAL jest krytyczna czasowo i ściśle związana z mikrojądrem czasu rzeczywistego Linux RTAI. W warstwie HAL można wprowadzać własne moduły czasu rzeczywistego.

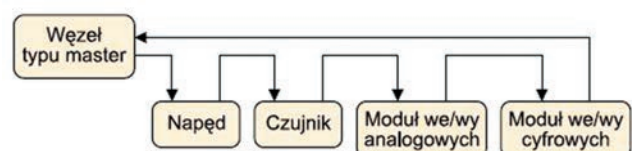
W opracowanym układzie sterowania w programie LinuxCNC zaimplementowano stos komunikacyjny magistrali EtherCAT oraz moduły specjalne do obsługi serwonapędów (serwonapędów firmy Delta Electronics, Inc.) i wejść/wyjść, zgodne z protokołem CANopen – profile komunikacyjne CiA402 i CiA401.

Program LinuxCNC realizuje bardzo rozbudowany zestaw G-kodów (RS274NGC) [8] służących do programowania wieloosiowych maszyn CNC. Kod G61 zapewnia dokładne osiągnięcie każdego punktu zdefiniowanego w programie technologicznym. Kod G64 realizuje funkcję Look Ahead, która odpowiada za wygładzanie trajektorii (uzyskanie ciągłej pochodnej toru ruchu) i poprawę jakości obróbki. Program LinuxCNC pozwala na trapezową realizację profilowania prędkości.

## Magistrala EtherCAT w układzie sterowania CNC

Standardowy protokół komunikacyjny Ethernet TCP/IP [9] uniemożliwia uzyskanie wystarczającego determinizmu zapewniającego synchroniczne sterowanie serwonapędami w maszynach wieloosiowych CNC. W przeciwieństwie do Ethernet TCP/IP protokół EtherCAT realizuje przesyłanie izochroniczne i spełnia wysokie wymagania stawiane aplikacjom sterowania ruchem.

W warstwie fizycznej, tj. w warstwie 1. modelu OSI (*open systems interconnection*), protokół EtherCAT jest identyczny z analogiczną warstwą protokołu Ethernet TCP/IP, co pozwala na zastosowanie standardowych kart sieciowych dostępnych w komputerach PC. W typowej sieci EtherCAT znajduje się jedno urządzenie nadzorcze oraz wiele urządzeń podrzędnych (maksymalnie 65 535). Sieć ma budowę logicznego pierścienia. W układzie sterowania CNC ramka EtherCAT wysyłana jest przez urządzenie nadrzędne, tj. komputer PC, i zawiera dane przeznaczone dla każdego z urządzeń podrzędnych w sieci. W trakcie otrzymywania i dalszego przekazywania ramki każde urządzenie podrzędne realizuje proces odczytywania i modyfikacji danych oraz wpisywania do ramki nowych danych. Ramka jest przekazywana przez każdy kolejny węzeł sieci, a następnie wraca do komputera PC.



Rys. 3. Schemat przepływu informacji w magistrali EtherCAT



Opóźnienia propagacji ramki są minimalne (od 230 ns do 1  $\mu$ s dla każdego węzła sieci). Przykładowy schemat przepływu informacji w magistrali EtherCAT przedstawiono na rys. 3.

Warstwa aplikacji stosu EtherCAT bazuje na protokole komunikacyjnym CANopen, który zawiera bibliotekę obiektów OBD (CiA301). W strukturze biblioteki obiektów OBD (*object dictionary*) zawarte są dane o wszystkich parametrach odnoszących się do stosu komunikacyjnego EtherCAT, a także zmienne procesowe, przesyłane z urządzenia nadzorczego do urządzeń podrzędnych. W zależności od rodzaju urządzeń podrzędnych wyróżnia się kilka profili komunikacyjnych (*device profiles*). Określają one zestaw obiektów zawierających konfigurację zmiennych procesu, charakterystycznych dla danego typu węzła. Profil komunikacyjny układów wejść i wyjść jest zdefiniowany w standardzie CiA401, a serwonapędów – w standardzie CiA402. Każdy serwonapęd obsługujący protokół EtherCAT musi mieć bibliotekę OBD w standardzie CiA402. Obiektami zdefiniowanymi przez CiA402 mogą być informacje m.in. o: pozycji zadanej, pozycji rzeczywistej, wartości prędkości, wartości prądu, stanie logicznym cyfrowych wejść/wyjść, wartościach współczynników wzmocnień regulatorów typu PID i feedforward, konfiguracji trybu pracy serwonapędu (w trybie momentowym, zadanej prędkości lub położenia). Opracowany sterownik CNC wspiera standard CiA402.

Alternatywnie EtherCAT umożliwia wysyłanie niektórych danych za pomocą protokołu TCP/IP z pominięciem stosu EtherCAT.

### Możliwości technologiczne układu sterowania, programowanie

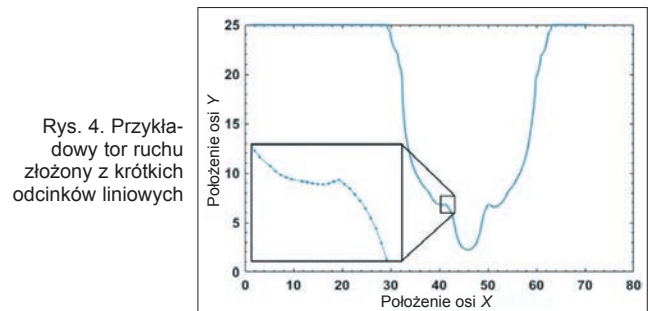
Oprogramowanie LinuxCNC ma wiele funkcji technologicznych, które są dostępne z poziomu języka G-Code RS274NGC. Gdy zachodzi konieczność realizacji złożonych kształtów, w programie technologicznym można zdefiniować krzywe wielomianowe sklejane typu B-Spline lub NURBS (kody G5, G5.1, G5.2, G5.3). Istnieje wiele predefiniowanych cykli programowych do przeprowadzenia typowych operacji technologicznych (np. wiercenia – G81-83, rozwiercania – G85-89, gwintowania – G84). Interpreter języka pozwala na użycie instrukcji programowych, takich jak: pętle programowe, instrukcje warunkowe, skoki programowe czy wywoływanie podprogramów.

Ważne są funkcje wygładzania zadanego toru ruchu (*blending*). Program technologiczny zapisany w kodzie G z reguły ma postać odcinków liniowych lub łuków. Na styku segmentów toru ruchu nie jest gładki, co wywołuje duże zmiany momentów silników napędowych oraz duże zmiany prędkości i drgania w układzie mechanicznym. Obecnie do generowania kodu technologicznego powszechnie używa się oprogramowania CAD/CAM. Utworzony w ten sposób program często składa się z wielu bardzo krótkich odcinków liniowych, na których maszyna nie zawsze może osiągnąć maksymalne zaprogramowane prędkości posuwu. Wykonywanie programu (funkcja G61) jest wolniejsze z uwagi na zatrzymanie ruchu na końcu każdego odcinka liniowego. Funkcja wygładzania G64 eliminuje ten problem przez wprowadzenie łuku między dwoma sąsiednimi segmentami. Zatrzymanie na końcu segmentu nie jest konieczne, a proces obróbki przebiega znacznie szybciej. Do poprawnego wygenerowania profilu prędkości posuwu konieczna jest analiza z wyprzedzeniem określonej liczby segmentów kodu (tzw. *look-ahead*).

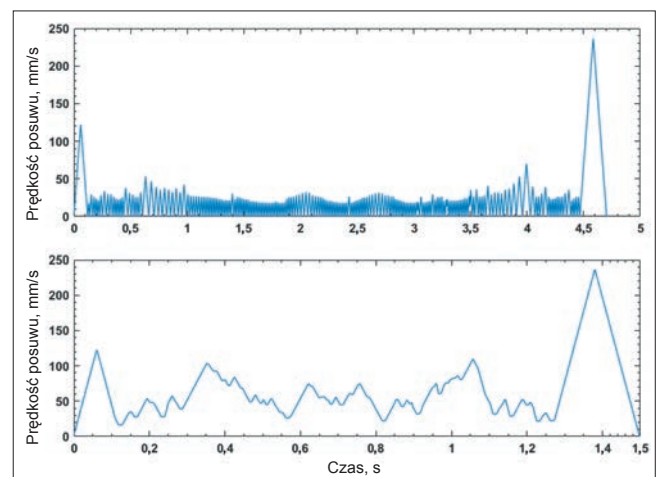
Na rys. 4 pokazano przykładowy tor ruchu złożony z krótkich odcinków liniowych. Ruch zrealizowano z wyłą-

czonym i włączonym wygładzaniem. Przebiegi prędkości przedstawiono na rys. 5.

Czas pokonywania toru ruchu przy zadanej prędkości posuwu 15 m/min bez wygładzania był znacznie dłuższy (blisko 5 s) niż z włączonym wygładzaniem (ok. 1,5 s). W praktyce brak wygładzania nie tylko wydłuża czas obróbki, lecz także negatywnie wpływa na dokładność od-twarzania trajektorii oraz powoduje drgania suportów i pogorszenie jakości obrabianej powierzchni.

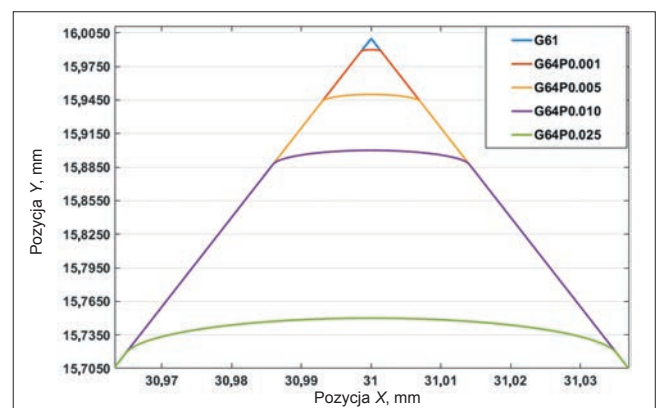


Rys. 4. Przykładowy tor ruchu złożony z krótkich odcinków liniowych



Rys. 5. Przebiegi prędkości posuwu osi przy wyłączonym (górny wykres) oraz włączonym (dolny wykres) wygładzaniu

Funkcja wygładzania – kod G64 – dąży do takiego wygładzenia zadanej trajektorii, aby prędkość posuwu była możliwie bliska prędkości zadanej. Dla dużych prędkości posuwu może to skutkować znacznymi rozbieżnościami pomiędzy zadaną a faktycznie realizowaną trajektorią. Możliwe jest określenie dopuszczalnej odchyłki wygładzonej trajektorii od trajektorii zadanej z zastosowaniem polecenia: kod G64 Px (gdzie x to zadana odchyłka w mm). Odległość szczytu łuku dopasowanego na styku segmentów liniowych od punktu wspólnego obu segmentów



Rys. 6. Fragment toru ruchu (narożnik) z różnymi odchyłkami błędu konturu

jest wtedy równa zadanej odchyłce. Modyfikując ten parametr, użytkownik osiąga kompromis pomiędzy szybkością realizacji zadanego toru ruchu a dokładnością jego odtwarzania.

Na rys. 6 porównano fragment toru ruchu wygładzonego z zastosowaniem różnych wartości odchyłki błędu konturu. Maksymalne zadane odchyłki trajektorii wygładzonej od trajektorii zadanej nie zostały przekroczone.

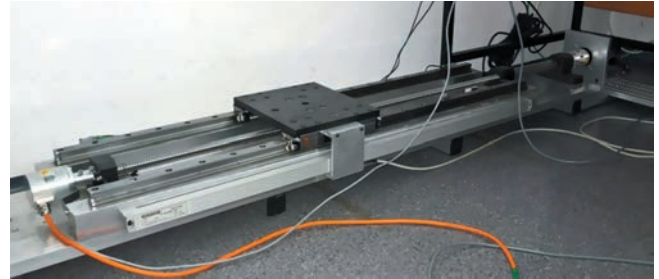
### Osiągnięte parametry, przykładowe wdrożenie

Układ sterowania składał się z: komputera PC z procesorem Intel Core i3, karty sieciowej z portem Ethernet typu Realtek 8111/8168B [10], czterech osi numerycznych z serwonapędami ASDA-A2-0721-E [11], modułu sprzęgającego wejścia i wyjścia z portem Ethernet EK1828 [12], układów wejść dyskretnych EL1008 [13], wyjść dyskretnych EL2008 [14] i modułu umożliwiającego podłączenie przetwornika obrotowo-impulsowego przyrostowego EL5101-0010 [15] firmy Beckhoff. Parametry serwonapędów ASDA-A2-0721-E firmy Delta Electronics, Inc. były następujące: moc 750 W, moment obrotowy nominalny 2,4 Nm, nominalna prędkość obrotowa 3000 obr/min, rozdzielczość układów pomiarowych położenia 1280 000 imp/obr. Parametry regulatorów położenia i prędkości serwonapędów ASDA-A2-0721-E dobrano w oprogramowaniu narzędziowym ASDA-Soft. Dzięki standardowej funkcji autostrojenia uzyskano pasmo przenoszenia regulatora prędkości  $BW = 68$  Hz. Z uwagi na niską wartość  $BW$  ponownie dobrano parametry regulatora, wykorzystując funkcję do analizy częstotliwościowej i filtry tłumiące częstotliwości rezonansowe. Tym razem uzyskano pasmo przenoszenia regulatora prędkości  $BW = 160$  Hz oraz zachowano 14 dB zapasu amplitudy i  $55^\circ$  zapasu fazy [16].

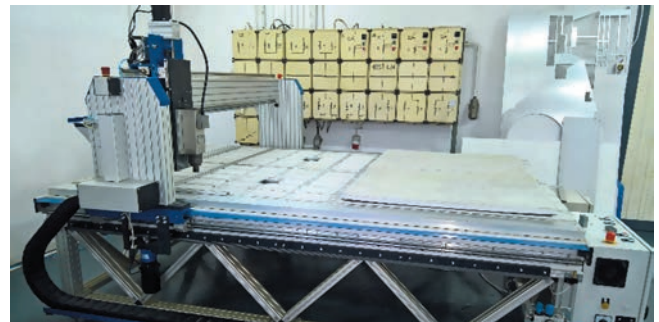
Badania przeprowadzono na stanowisku złożonym z modułu ruchu liniowego (rys. 7) i na maszynie trzyosiowej (rys. 8) wdrożonej w PIAP-OBRUSN w Toruniu. Moduł ruchu liniowego wyposażono w linię pomiarową o rozdzielczości  $1 \mu\text{m}$  i przetwornik obrotowo-impulsowy przyrostowy (firmy Kubler) o rozdzielczości 144 000 imp/obr. Skok przekładni śrubowej tocznej wynosił 5 mm/obr.

Osiągnięte parametry układu przedstawiono w tablicy. Na rys. 9 zaprezentowano trajektorię wykorzystaną do testowania błędów nadążania.

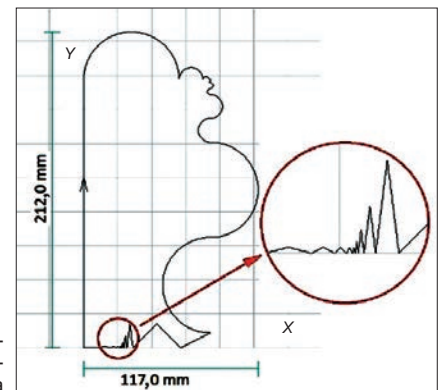
Prędkość i przyspieszenie modułu ruchu liniowego podczas realizacji testowej trajektorii pokazano na rys. 10. Zadany w pliku CNC posuw ruchów roboczych wynosił 15000 mm/min, co odpowiadało nominalnej prędkości obrotowej silnika, tj. 3000 obr/min. Pomiary błędów nadążania przeprowadzono na module ruchu liniowego, wyposażonym w precyzyjne układy pomiarowe.



Rys. 7. Moduł ruchu liniowego



Rys. 8. Maszyna z opracowanym układem sterowania CNC



Rys. 9. Trajektorja wykorzystana do testowania błędów nadążania

TABLICA. Układ sterowania CNC z napędami ASDA-A2-0721-E

Opis badania	Osiągnięte parametry	Uwagi
Fluktuacje położenia odczytanego z przetwornika pomiarowego Hiperface silnika dla układu niewykonującego ruchu. Odczyt położenia z przetwornika obrotowo-impulsowego o rozdzielczości 144 000 imp/obr nie zmieniał się	$\pm 2 \times 2\pi / 1280000$	Zadane położenie równe rzeczywistemu położeniu silnika. Brak ruchu
Pomiar realizacji zadanego ruchu obrotowego o wartości: • $+1 \times 2\pi / 144000$ rad, • $-1 \times 2\pi / 144000$ rad – tj. 1 inkrement przetwornika obrotowo-impulsowego w obu kierunkach	$+1 \times 2\pi / 144000$ rad $-1 \times 2\pi / 144000$ rad	Ruch był zrealizowany w obu kierunkach. Osiągnięto przemieszczenia: $+1 \times 2\pi / 144000$ rad oraz $-1 \times 2\pi / 144000$ rad, tj. $\pm 0,03472 \mu\text{m}$ ; śruba toczna o skoku 5 mm/obr
Pomiar realizacji zadanego ruchu obrotowego o wartości: • $+1 \times 2\pi / 144000$ rad, • $-1 \times 2\pi / 144000$ rad – tj. 1 inkrement przetwornika obrotowo-impulsowego w obu kierunkach. Wał silnika obciążono momentem 1,8 Nm	$103 \times 2\pi / 144000$ rad	Przed obciążeniem rzeczywiste położenie było równe zadanemu położeniu wału silnika
Pomiar błędu nadążania przy realizacji zadanej trajektorii (rys. 9) z zadaną prędkością 3000 obr/min (15 m/min), równą prędkości nominalnej silnika	Maksymalny błąd nadążania nie przekracza 0,1 mm	Pomiar dla jednej osi (śruba toczna o skoku 5 mm/obr)



Wyniki badań dla różnych wartości wyprzedzających od prędkości i przyspieszenia  $VEL_{FF}$  i  $ACC_{FF}$  przedstawiono na rys. 11.

Przy sterowaniu bez wartości wyprzedzających od prędkości i przyspieszenia ( $VEL_{FF} = 0$ ,  $ACC_{FF} = 0$ ) błędy nadążania ze względu na regulator położenia typu P były proporcjonalne do aktualnej prędkości i przy paśmie przenoszenia serwonapędu  $BW = 160$  Hz oraz prędkości nominalnej silnika wynosiły ok. 2,5 mm.

Przy generowaniu sygnału wyprzedzającego proporcjonalnego do aktualnej prędkości:

$$VEL_{FF} = K_1 \frac{d}{dt}(POS) \quad (1)$$

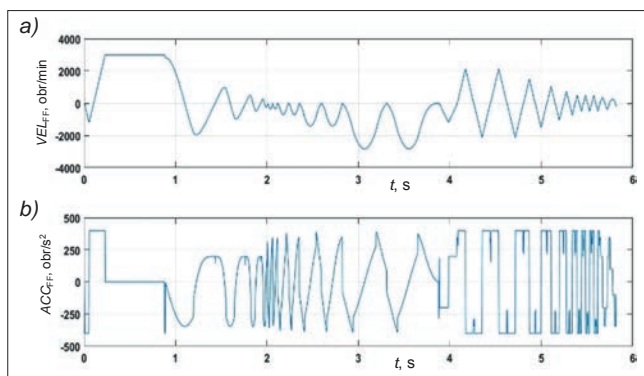
gdzie:  $POS$  – zadawane położenie,  $K_1$  – współczynnik dobrany tak, aby zminimalizować błąd nadążania dla prędkości nominalnej.

Uzyskano obniżenie błędu nadążania do poziomu poniżej 0,1 mm. Zgodnie z rys. 10b i 11b największe wartości błędów występują w fazie rozpędzania/hamowania serwonapędu.

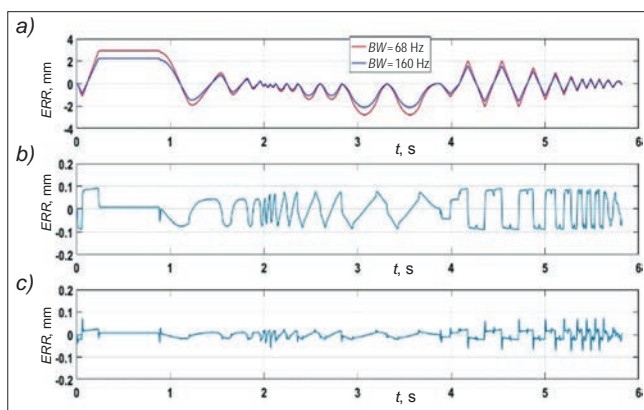
Przy generowaniu sygnału wyprzedzającego uwzględniającego dodatkowo przyspieszenie:

$$VEL_{FF} = K_1 \frac{d}{dt}(POS) + K_2 \frac{d^2}{dt^2}(POS) \quad (2)$$

Uzyskano dalsze zmniejszenie błędu nadążania. Z wykresu wynika, że największe błędy występują w fazie „zryw” serwonapędu. Ubocznym i niekorzystnym efektem w przypadku tego sterowania było pojawienie się znacznych impulsów prądu (szarpnięć) przy skokowych zmianach przyspieszenia.



Rys. 10. Prędkość (a) i przyspieszenie (b) zadawane dla modułu ruchu liniowego podczas realizacji testowej trajektorii



Rys. 11. Błędy nadążania w serwonapędzie modułu ruchu liniowego przy realizacji testowej trajektorii: a) bez sprzężeń wyprzedzających ( $VEL_{FF} = 0$ ,  $ACC_{FF} = 0$ ), b) ze sprzężeniem wyprzedzającym – wzór (1), c) ze sprzężeniem wyprzedzającym – wzór (2)

## Podsumowanie

Układ sterowania cechuje się prostą budową, a jego elementy składowe są tanie i dostępne. Oprogramowanie układu umożliwia tworzenie wyrafinowanych programów użytkowych w G-kodach, jak również opisywanie trajektorii za pomocą krzywych NURBS. Układ sterowania można łatwo zaadaptować do sterowania maszynami o różnej konfiguracji. Komunikacja przez magistralę EtherCAT jest deterministyczna, z małymi rozrzutami w cyklicznym przesyłaniu i odczytywaniu danych z serwonapędów oraz układów wejścia i wyjścia. Jedna przesyłana ramka obsługuje wszystkie serwonapędy, a jej opóźnienie przy przesyłaniu przez serwonapędy jest bardzo małe i kompensowane w serwonapędach. Układ sterowania z zastosowanymi napędami cechował się bardzo dużą rozdzielczością. Przemieszczenia były realizowane z błędem poniżej 1  $\mu\text{m}$ . Błędy nadążania przy prędkościach równych maksymalnym prędkościom osi maszyny również były małe.

Opracowany układ sterowania jest dobrą alternatywą dla dostępnych na rynku rozwiązań układów sterowania CNC maszyn, a zwłaszcza dla drogich układów sterowania zamkniętego.

## LITERATURA

- Huang H., Chi G., Wang Z. "Development and application of software for open and soft multi-axis EDM CNC systems". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 86, 9 (2016): s. 2689–2700, DOI:10.1007/s00170-016-8353-6.
- www.beckhoff.pl (dostęp: 11.03.2017 r.).
- www.beckhoff.com/english.asp?highlights/twincat-cnc/default.htm (dostęp: 11.03.2017 r.).
- Chen Xin, Li Di, Wan Jiafu et al. "A clock synchronization method for EtherCAT master". *Microprocessors and Microsystems*. 46, Part B (2016): s. 211–218, DOI: 10.1016/j.micpro.2016.03.002.
- López-López F., Gomis-Bellmunt O., Teixidó-Casas M., Rafecas-Sabaté J., Muñoz-Gazquez J.P. "A novel educational platform to teach CANopen field bus". *Computer Applications in Engineering Education*. 19, 2 (2011): s. 377–384, DOI:10.1002/cae.20319.
- Wawrzak A., Erwiński K., Karwowski K., Paprocki M., Kłosowiak M. "PC based CNC control system with EtherCAT fieldbus". *Pomiar Automatyka Robotyka*. 20, 2 (2016): s. 29–34, DOI: 10.14313/IPAR\_220/29.
- Erwiński K., Paprocki M., Grzesiak L.M., Karwowski K., Wawrzak A. "Application of Ethernet Powerlink for communication in a Linux RTAI open CNC system". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 60, 2 (2013): s. 628–636, DOI: 10.1109/TIE.2012.2206348.
- Ferreira J.C.E., Benavente J.C.T., Inoue P.H.S. "A web-based CAD/CAPP/CAM system compliant with the STEP-NC standard to manufacture parts with general surfaces". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 39, 1 (2017): s. 155–176. DOI:10.1007/s40430-016-0528-4.
- Mejías A., Herrera R.S., Márquez M.A., Calderón A.J., González I., Andújar J.M. "Easy handling of sensors and actuators over TCP/IP networks by open source hardware/software". *Sensors*. 17(1), 94 (2017): s. 1–23, DOI:10.3390/s17010094.
- bothhand.info/pdf/spec-8111b(140).pdf (dostęp: 11.03.2017 r.).
- www.delta.com.tw/product/em/motion/motion\_servo/download/manual/DELTA\_IA-ASDA\_A2\_UM\_EN\_20141212.pdf (dostęp: 11.03.2017 r.).
- https://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/ek18xxen.pdf (dostęp: 11.03.2017 r.).
- https://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/el10xx\_el11xxen.pdf (dostęp: 11.03.2017 r.).
- https://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/EL20xx\_EL2124en.pdf (dostęp: 11.03.2017 r.).
- https://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-terminals/el5101en.pdf (dostęp: 11.03.2017 r.).
- Aström K.J., Hägglund T. "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning". 2nd ed. Instrument Society of America, 1995. ■