

dr inż. Bogdan Broel-Plater  
Wydział Elektryczny  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

## WYKORZYSTANIE LOGIKI ROZMYTEJ DO POPRAWY JAKOŚCI STEROWANIA CYFROWEGO SERWONAPĘDU

*W artykule przedstawiono sposób poprawy jakości sterowania cyfrowego serwonapędu dzięki użyciu logiki rozmytej. Logika ta została użyta do obliczania wartości nastaw oraz korygowania wartości zadanych serwonapędu zastosowanego do sterowania obrabiarką numeryczną CNC. Rozważania zilustrowano wynikami komputerowych symulacji pracy cyfrowego serwonapędu ACOPOS firmy B&R.*

### EMPLOYING FUZZY-LOGIC FOR IMPROVING CONTROL PERFORMANCE OF A DIGITAL SERVODRIVE

*The paper presents a way to improve control performance of a digital servo-drive by means of fuzzy-logic. Fuzzy-logic has been employed to evaluate settings and to correct set-points of a servo-drive used to control a CNC machine tool. The study is illustrated by results of computer-simulated operation of the ACOPOS digital servo-drive manufactured by B&R.*

#### 1. WSTĘP

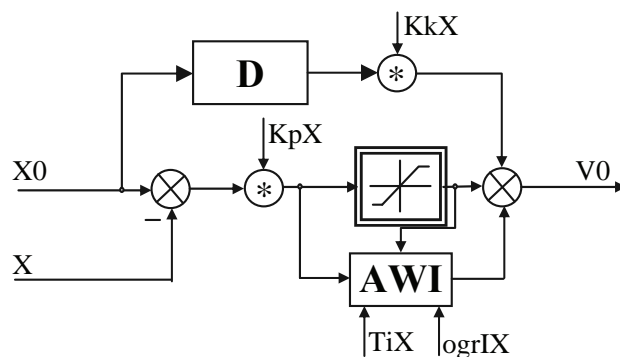
Od współczesnych obrabiarek CNC wymaga się wysokiej dokładności ruchu osi w szerokim zakresie możliwych do uzyskania prędkości i przyspieszeń [5,7,8]. Z uwagi na nieliniowe opory ruchu oraz silnie zmienne obciążenia związane z procesem obróbki uzyskanie przez klasyczne serwonapędy żądanej dokładności sterowania jest jednak szczególnie trudne przy niewielkich prędkościach. Wymaganą jakość sterowania może jednak zapewnić serwonapęd, w którym algorytmy rozmyte będą wspomagać klasyczne, analityczne algorytmy sterowania cyfrowego.

Spośród kilku możliwych sposobów wykorzystania logiki rozmytej do wspomaganie pracy serwonapędu w referacie przedstawiono – zbadane na drodze symulacji komputerowych – jej wykorzystanie do określania wartości wybranych nastaw i korekcji wartości zadanych analitycznych algorytmów sterowania wykorzystywanych w cyfrowych serwonapędach ACOPOS firmy Bernecker & Rainer. Ten typ serwonapędu wybrano gdyż są to nowoczesne urządzenia coraz powszechniej stosowane także w polskim przemyśle [1,3].

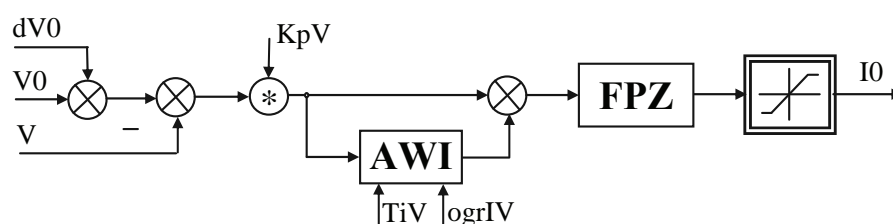
#### 2. ALGORYTM STEROWANIA SERWONAPĘDU ACOPOS

Klasyczna struktura sterowania serwonapędu to kaskadowe połączenie trzech regulatorów: położenia, prędkości oraz prądu silnika [5, 7, 8]. Struktura ta jest także wykorzystywana w serwonapędach ACOPOS. Procesor sygnałowy wykorzystywany w tych serwonapędach pozwala na wykonywanie obliczeń algorytmów poszczególnych regulatorów serwonapędu z okresem: regulator prądu – 50  $\mu$ s, regulator prędkości – 200  $\mu$ s, regulator położenia – 400  $\mu$ s. Dzięki sieci Ethernet PowerLink można także co 100  $\mu$ s zmieniać wartości poszczególnych parametrów tych regulatorów oraz korygować ich wartości zadane [1,3].

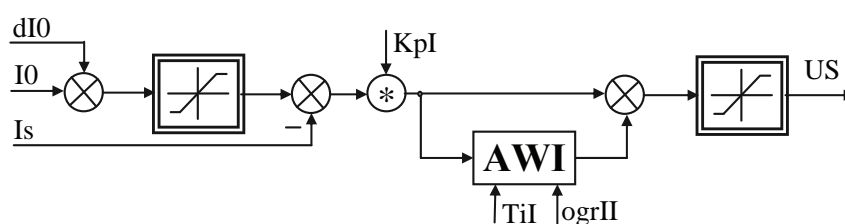
Uprozczone schematy blokowe poszczególnych regulatorów serwonapędu ACOPOS pokazano na rys. 1 – 3 [1]. Są to regulatory proporcjonalno-całkujące z anti-windup'em akcji całkującej minimalizującym przeregulowania.



Rys. 1. Schemat blokowy regulatora położenia (RX) serwonapędu ACOPOS; AWI – blok całkowania z anti-windup'em, D – blok różniczkowania toru feed-forward,  $K_pX$  – wzmacnienie proporcjonalne,  $T_iX$  – stała czasowa całkowania,  $ogrIX$  – poziom ograniczania akcji całkującej,  $K_kX$  – wzmacnienia sprzężenia feed-forward,  $X_0$  i  $X$  – zadane i aktualne położenie serwonapędu,  $V_0$  – zadana prędkość ruchu serwonapędu.



Rys. 2. Schemat blokowy regulatora prędkości (RV) serwonapędu ACOPOS; AWI – blok całkowania z anti-windup'em, FPZ – filtr pasmowo zaporowy,  $K_pV$  – wzmacnienie proporcjonalne,  $T_iV$  – stała czasowa całkowania,  $ogrIV$  – poziom ograniczania akcji całkującej,  $V_0$  i  $V$  – zadana i aktualna prędkość ruchu serwonapędu,  $dV_0$  – wartość korygująca zadaną prędkość tego ruchu,  $I_0$  – zadana wartość prądu silnika serwonapędu.



Rys. 3. Schemat blokowy regulatora prądu (RI) serwonapędu ACPOS; AWI – blok całkowania z anti-windup'em,  $K_pI$  – wzmacnienie proporcjonalne,  $T_iI$  – stała czasowa całkowania,  $ogrII$  – poziom ograniczania akcji całkującej,  $I_0$  i  $I_s$  – zadana i aktualna wartość prądu pobieranego przez silnik serwonapędu,  $dI_0$  – wartość korygująca zadany prąd silnika.

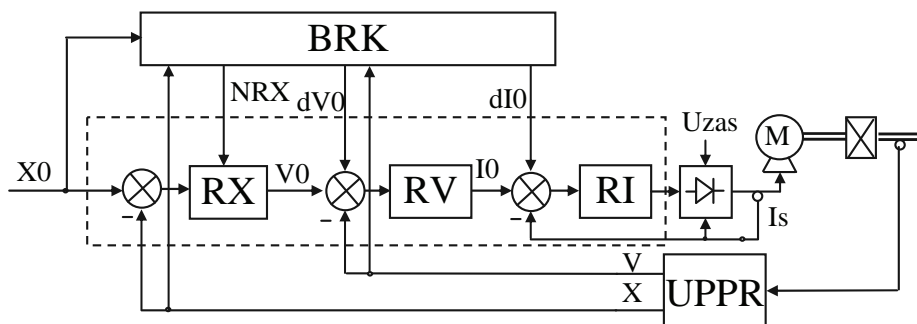
Regulator położenia (RX) wykorzystuje dodatkowo różniczkujące sprzężenie typu feed-forward wspomagające nadążanie serwonapędu za zmianami wartości zadanej. W regulatorze prędkości (RV) wykorzystywany jest pasmowo zaporowy filtr cyfrowy (FPZ) przeciwdziałający powstawaniu drgań mechanicznych zespołu silnik serwonapędu – śruba pociągowa – stół roboczy. Producent serwonapędu przewidział także możliwość niezależnego korygowania dwóch wartości zadanych (sygnały  $dV_0$  i  $dI_0$ ) [1].

### 3. ROZMYTA KOREKCJA WARTOŚCI PARAMETRÓW SERWONAPĘDU

Po analizie wyników szeregu komputerowych symulacji pracy serwonapędu – dla różnych przebiegów czasowych jego zadanej wartości położenia ( $X_0(t)$ ) i masy ( $m_p$ ) przedmiotu zamocowanego na poruszającym się stole obrabiarki – okazało się, że jakość sterowania

ruchem serwonapędu najsilniej zależy od wartości wzmocnienia  $K_pX$  regulatora położenia, stałej czasowej całkowania  $T_iX$  tego regulatora oraz poziomu nasycenia  $ogrIX$  jego akcji całkującej a także od wartości  $dV0$  korygującej zadaną prędkość ruchu i wartości  $dI0$  korygującej zadaną wartość prądu silnika.

Wartości tych parametrów są w - opisywanym układzie - określane w bloku rozmytej korekcji na podstawie pomiaru położenia ( $X$ ) i prędkości ( $V$ ) ruchu stołu obrabiarki oraz oszacowania masy ( $mp$ ) poruszanego stołu - rys. 4.

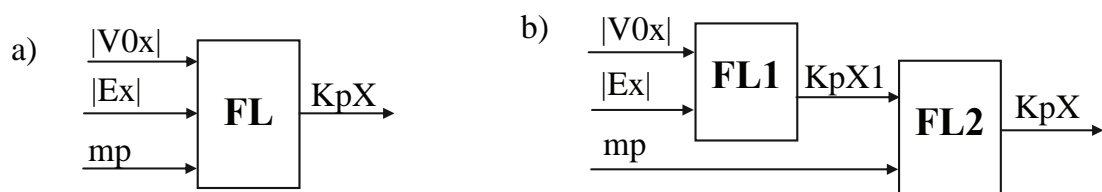


Rys. 4. Schemat blokowy przedstawianego serwonapędu; RX - regulator położenia, RV - regulator prędkości, RI - regulator prądu, UPRR - układ pomiaru parametrów ruchu stołu obrabiarki, BRK - blok rozmytej korekcji,  $X0$  i  $X$  - zadane i aktualne położenie stołu,  $V0$  i  $V$  - zadana i aktualna prędkość ruchu stołu,  $dV0$  - wartość korygująca zadaną prędkość tego ruchu,  $I0$  i  $Is$  - zadana i aktualna wartość prądu pobieranego przez silnik serwonapędu,  $dI0$  - wartość korygująca zadany prąd silnika, NRX - nastawy ( $K_pX$ ,  $T_iX$ ,  $ogrIX$ ) regulatora położenia (RX) serwonapędu

Podstawowym problemem ograniczającym użyteczność rozmytych aproksymacji funkcji wielu zmiennych jest bardzo duża liczba parametrów takich opisów. Dlatego też w praktycznych aplikacjach powszechnie stosowane są pewne uproszczenia zmniejszające ilość parametrów rozmytych aproksymacji.

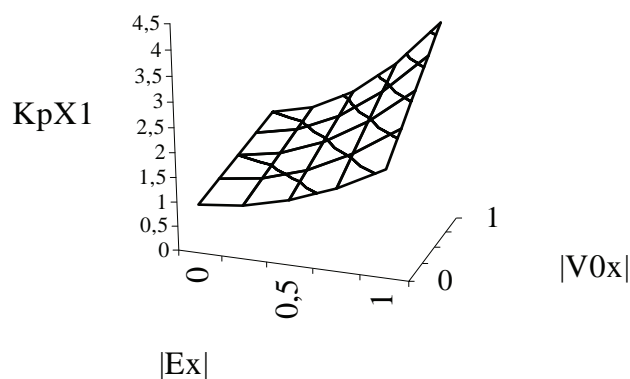
Najczęściej stosowane uproszczenie to dekompozycja rozmytej funkcji wielu zmiennych na połączone ze sobą funkcje dwu zmiennych z komplementarnymi, trójkątnymi funkcjami przynależności zmiennych wejściowych i singletonowymi funkcjami przynależności zmiennej wyjściowej wyostrzanej metodą środka ciężkości [6]. Funkcje takie (nazywane dalej funkcjami bazowymi) wykorzystano także w opisywanym rozwiązaniu.

Analiza wyników symulacji komputerowych pokazała, że wartość wzmocnienia proporcjonalne ( $K_pX$ ) regulatora położenia powinno zależeć od modułów zadanej szybkości ruchu ( $V0$ ) i aktualnego błędu położenia ( $Ex$ ) stołu oraz jego masy ( $mp$ ) - rys. 5a. Ze względu na charakter tej zależności do jej aproksymacji zastosowano kaskadowe połączenie dwóch rozmytych funkcji bazowych (rys. 5b).

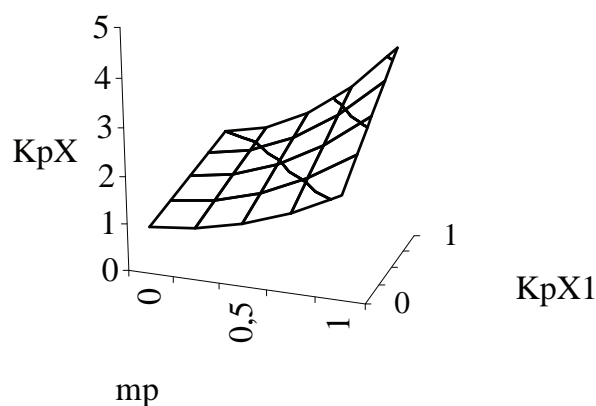


Rys. 5. Rozmyta aproksymacja wzmocnienia ( $K_pX$ ) regulatora położenia: a - jako funkcja trójwejściowa, b - przy pomocy dwóch bazowych funkcji rozmytych.

Na rys. 6 i 7 pokazano powierzchnie aproksymujące funkcji FL1 i FL2.

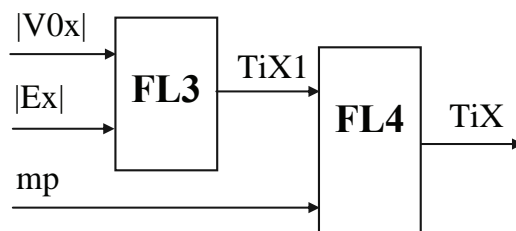


Rys. 6. Powierzchnia aproksymująca funkcji FL1

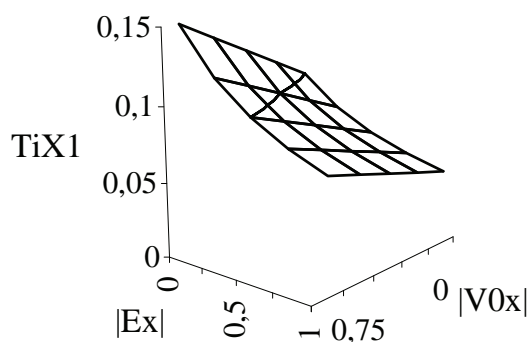


Rys. 7. Powierzchnia aproksymująca funkcji FL2

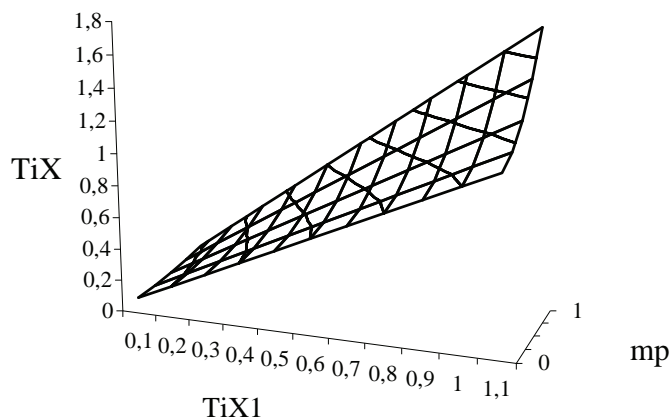
Na rys. 8 – 12 pokazano rozmyte aproksymacje pozostałych parametrów regulatora położenia (RX) oraz odpowiadające im powierzchnie aproksymujące.



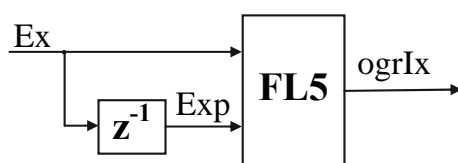
Rys. 8. Rozmyta aproksymacja stałej czasowej (TiX) regulatora położenia



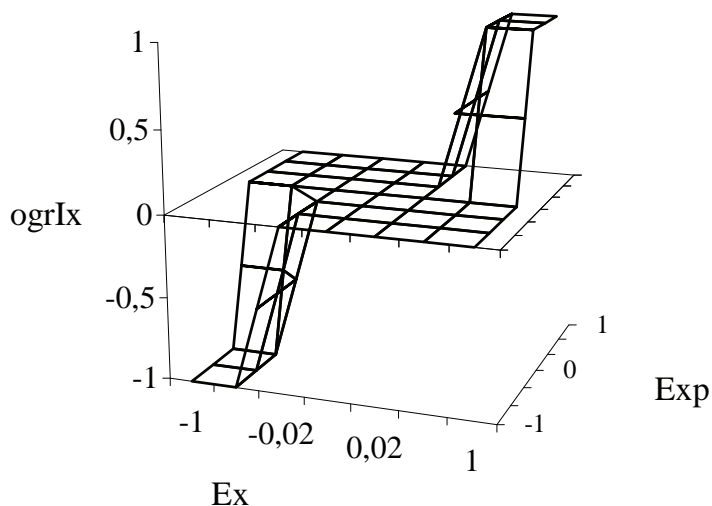
Rys. 9. Powierzchnia aproksymująca funkcji FL3



Rys. 10. Powierzchnia aproksymująca funkcji FL4



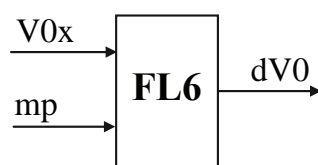
Rys. 11. Rozmyta aproksymacja wartości poziomu nasycenia (ogrIX) akcji całkującej regulatora położenia.



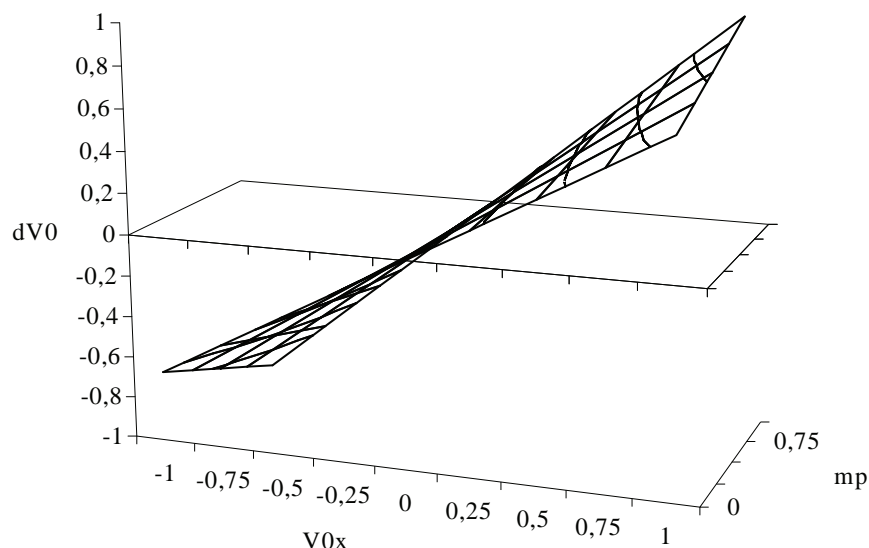
Rys. 12. Powierzchnia aproksymująca funkcji FL5

Akcja całkująca regulatora położenia (RX) pozwala na zwiększenie dokładności nadążania podczas programowej regulacji położenia oraz na uzyskiwanie dużych prędkości podczas ruchu ustawczego do zadanej pozycji. Jednak może ona prowadzić do powstawania przeregulowań i niestabilności układu sterowania. Zerowanie wartości zmiennej (ogrIX) dla niewielkich błędów położenia (Ex) pozwala na uniknięcie przeregulowań i zachowanie stabilność układu sterowania.

Na rys. 13–14 pokazano funkcje i powierzchnie aproksymujące sygnał dV0 korygujący wartość zadaną regulatora prędkości (RV).

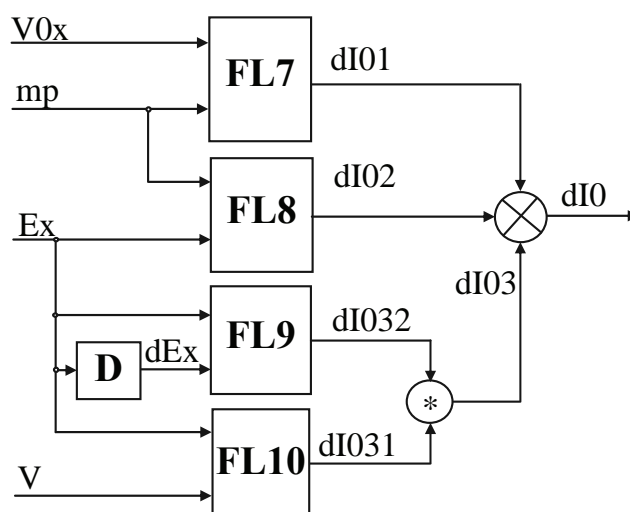


Rys. 13. Rozmyta aproksymacja sygnału  $dV0$  korygującego wartość zadaną regulatora prędkości RV.



Rys. 14. Powierzchnia aproksymująca funkcji FL6

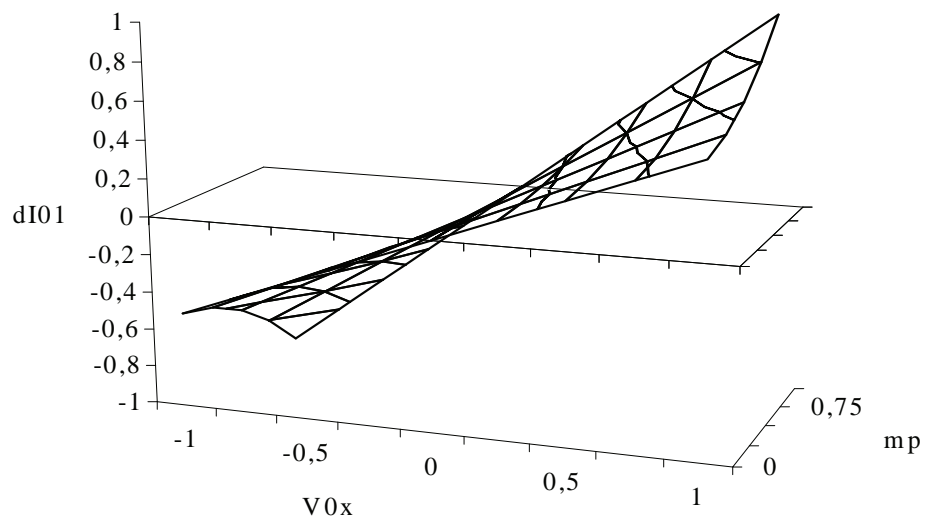
Aproksymacja sygnału korygującego wartość zadaną  $dI0$  regulatora prądu jest najbardziej złożona i tworzą ją cztery funkcje bazowe połączone w sposób pokazany na rys. 15. Powierzchnie aproksymujące te funkcje pokazano na rys. 16 -19.



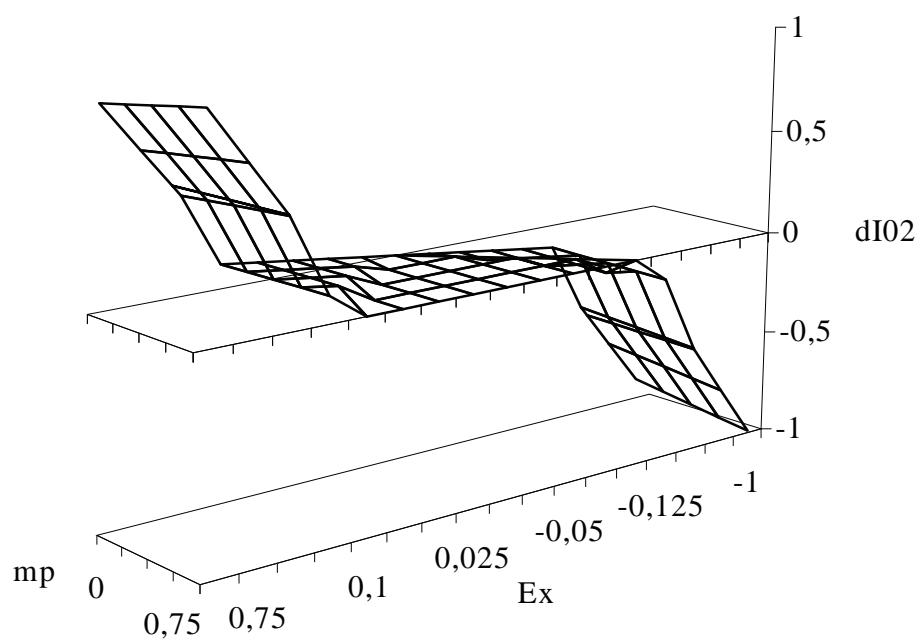
Rys. 15. Rozmyta aproksymacja sygnału  $dI0$  korygującego wartość zadaną regulatora prądu

Istotny wpływ na jakość sterowania ma uwzględnienie wpływu masy ( $mp$ ) przemieszczanego przedmiotu na wartości zarówno parametrów regulatorów jak i sygnałów korygujących ich wartości zadane. Podczas obróbki masa ta zmienia się a jej bezpośredni pomiar on-line jest wprawdzie możliwy, lecz mało praktyczny. Wydaje się jednak, że dla potrzeb sterowania

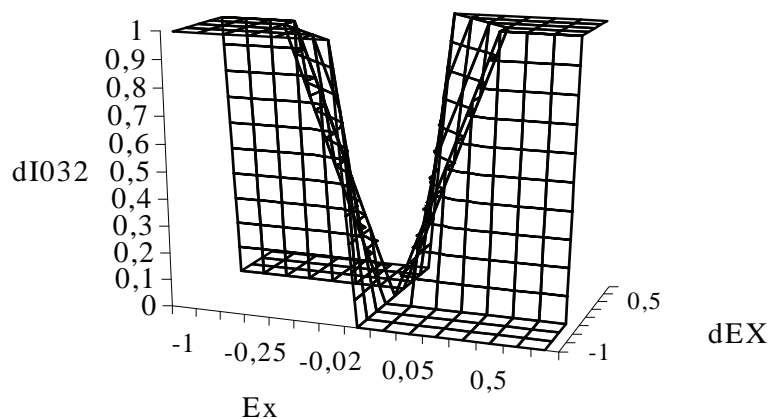
wystarczy dokonywanie określanie podczas obróbki wartości tej masy na podstawie znanych – z programu obróbki – parametrów skrawania (prędkość ruchu oraz głębokość i szerokość skrawania) i ciężaru właściwego materiału obrabianego przedmiotu.



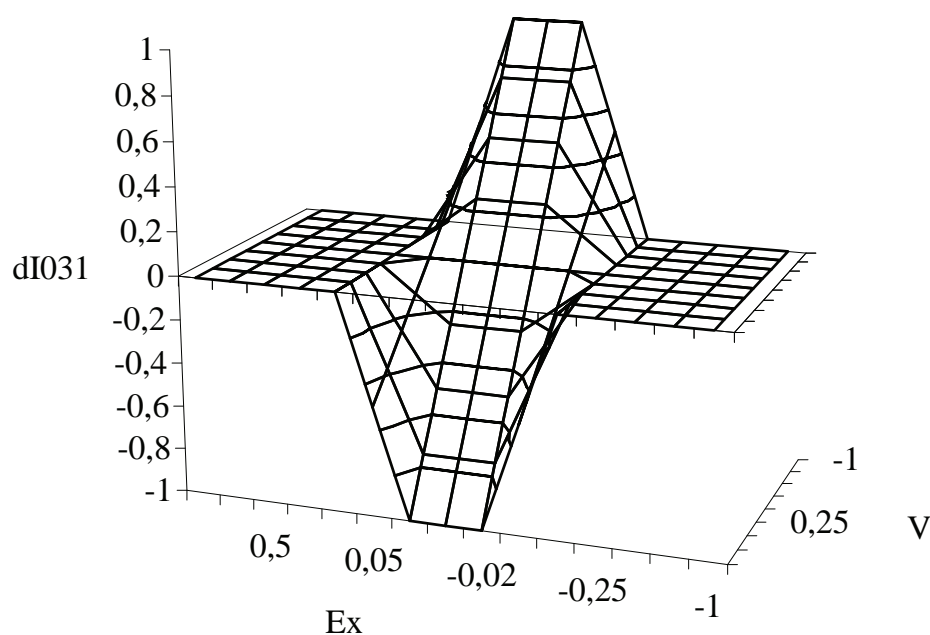
Rys. 16. Powierzchnia aproksymująca funkcji FL7



Rys. 17. Powierzchnia aproksymująca funkcji FL8



Rys. 18. Powierzchnia aproksymująca funkcji FL9



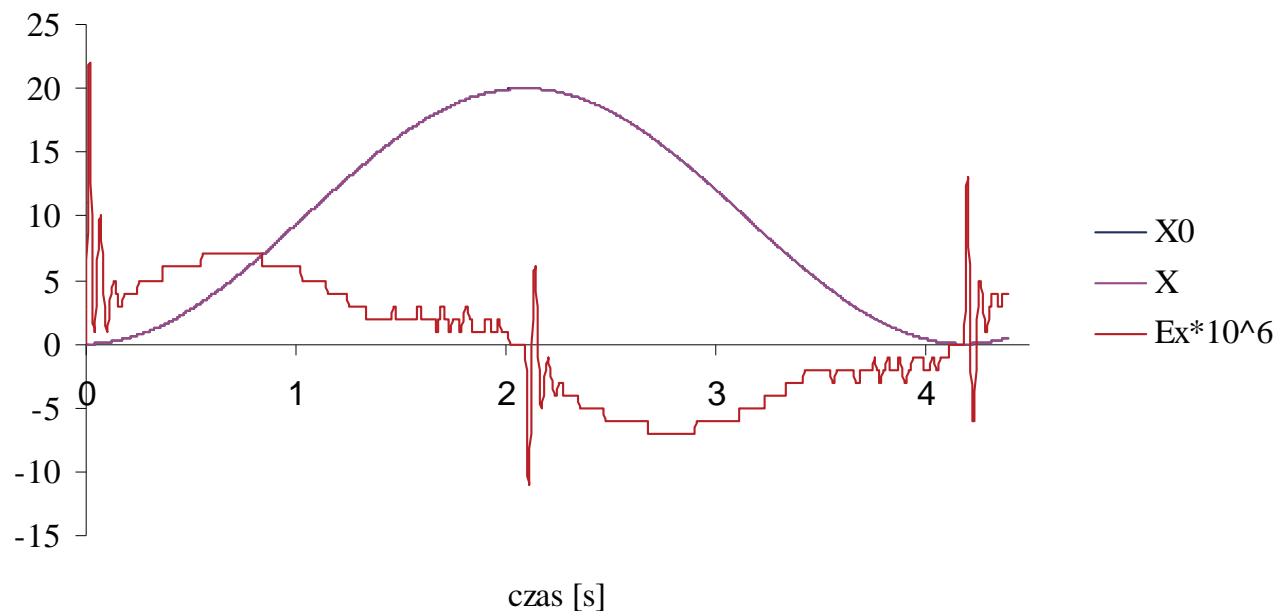
Rys. 19. Powierzchnia aproksymująca funkcji FL10

#### 4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

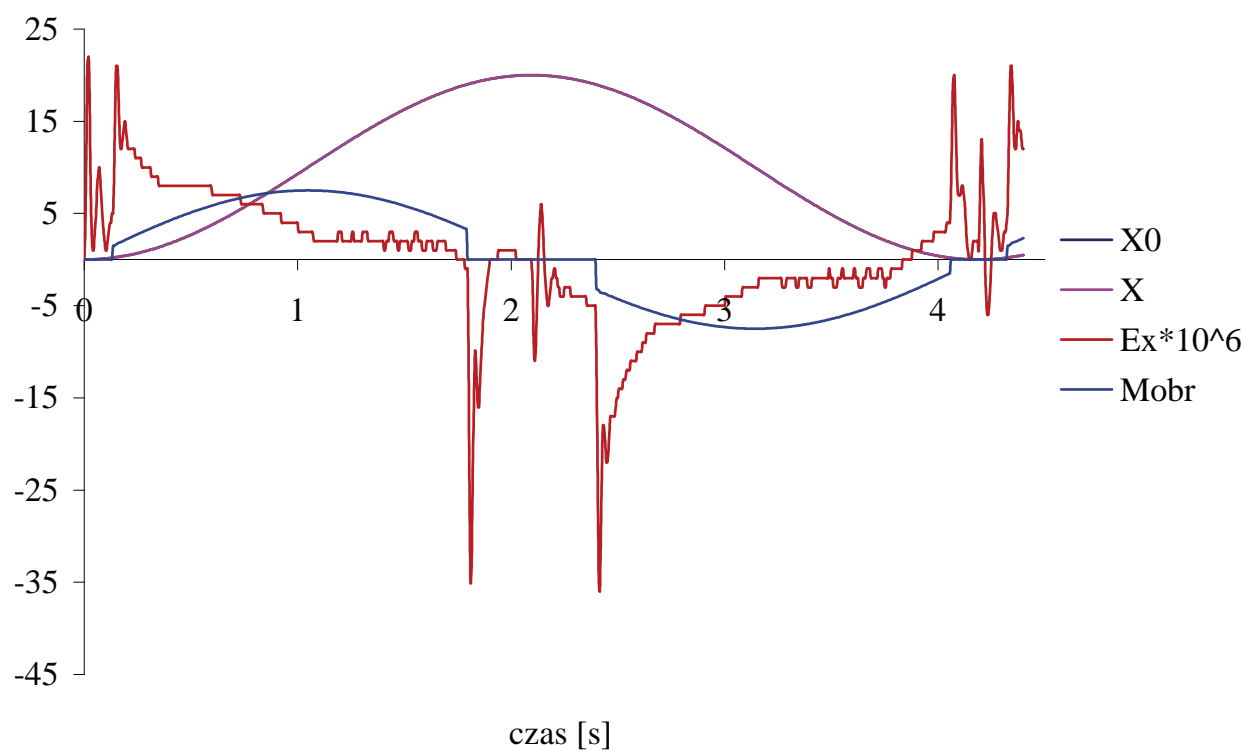
Projektowanie i badania algorytmu rozmytego wspomaganego pracy serwonapędu oparto na symulacjach komputerowych. Wybrane wyniki symulacji pracy serwonapędu, wspomaganego przez opisany algorytm rozmytego określania wartości jego parametrów, pokazano na rys. 20 i 21. Ilustrują one nadążanie rzeczywistego ( $X$ ) położenia przemieszczanego przedmiotu za zmiennym położeniem zadany ( $X_0$ ) oraz błąd ( $Ex$ ) śledzenia zadanego położenia. Podczas tych symulacji zadana prędkość ruchu przemieszczanego przedmiotu jest bliska zeru i zmienia znak, bowiem celem tych symulacji



było sprawdzenie skuteczności sterowania w tych – szczególnie trudnych ze względu na charakter oporów ruchu – warunkach.



Rys. 20. Przebieg zmian położenia zadanego ( $X_0$ ) i aktualnego ( $X$ ) oraz błędu sterowania ( $Ex$ ) podczas symulacji pracy serwonapędu bez skrawania



Rys. 21. Przebieg zmian położenia zadanego ( $X_0$ ) i aktualnego ( $X$ ) oraz błędu sterowania ( $Ex$ ) i momentu skrawania ( $Mobr$ ) podczas symulacji pracy serwonapędu z obciążonym do 75 % silnikiem

Na rys. 20 przemieszczany przedmiot nie jest poddawany obróbce skrawaniem. Na rys. 21 podczas ruchu przedmiotu jest skrawany i dlatego na tych rysunkach pokazany jest także przebieg symulowanego momentu skrawania *Mobr*.

## 5. WNIOSKI

Dzięki logice rozmytej można w różny sposób poprawić jakość działania układów automatycznego sterowania. Uniwersalność algorytmów rozmytych umożliwia nie tylko bezpośrednio wyliczać wartość sygnału sterującego [4] czy też adaptacyjnie nastawiać algorytm analitycznego sterowania [2]. W przedstawionym rozwiązaniu wykorzystano logikę rozmytą do określania – przy użyciu wcześniej zdefiniowanych dla danego serwonapędu wielowymiarowych funkcji rozmytych – wartości wybranych parametrów analitycznych algorytmów PI serwonapędu ACOPOS.

Wyniki dotychczasowych komputerowych badań symulacyjnych potwierdzają skuteczność działania opracowanego algorytmu rozmytego, lecz oczywiście muszą jeszcze zostać zweryfikowane praktycznie. Kolejnym etapem badań będzie sprawdzenie możliwości wykorzystania opisanej metody do poprawy jakości pracy serwonapędu firmy AEROTECH przeznaczanego do prowadzenia mikroobróbki skrawaniem, podczas której wymagana jest dokładność sterowania ruchem mikrofreza na poziomie lepszym niż 5  $\mu\text{m}$ .

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. ACOPS User's Manual
2. Dworak P., Pietruszewicz K.: A Fuzzy-Logic Based Tuning for a Velocity Controller of the DC Servo Drive, *Solid State Phenomena*, Vol 146-149, pp. 179–184, 2009
3. Serwonapędy: Technologie – Sprzedawcy – Oprogramowanie, *Control Engineering*, Polska, lipiec 2006
4. Garcia A. P., Rodriguez J.L.D.: Fuzzy Logic Controller Design Applied to Servo-drive Systems, *ICS'05 Proceedings of the 9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Systems*, 2005
5. Kosmol J.: Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie, WNT, Warszawa 1998
6. Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte, *Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT*, Warszawa, 1999
7. Suh S.-H, Kang S.-K, Chunk D.-H, Stroud I.: *Theory and Design of CNC Systems*, Springer Verlag, London, 2008
8. Younkin G. W.: *Industrial Servo Control Systems: Fundamentals and Applications*, Marcell Dekker Inc. 2003