

## **Algorytm zwiększający jakość sterowania powolnym ruchem cyfrowego serwonapędu**

**Abstract.** *In the paper a simple algorithm for performance improvement of motion control at speeds close to zero and minimal stepwise changes in set-point position is presented. Computer simulations show that the described solution ensures high control precision over a wide range of servodrive load variations, even if strong nonlinear static friction occurs in the system. The discussion is illustrated with results of computer simulations.*

**Słowa kluczowe:** serwonapęd, tarcie spoczynkowe, jakość sterowania, regulator PID

### **Wprowadzenie**

Powstające podczas pracy obrabiarek statyczne i dynamiczne obciążenia robocze oraz zmienne warunki pracy powodują, że uzyskanie wysokiej dokładności sterowania położeniem osi ich serwonapędów w szerokim zakresie prędkości zadanych jest trudne. Ze względu zaś na typowe - dla układów mechanicznych - nieliniowe tarcie statyczne problem jest szczególnie trudny, gdy zadane prędkości ruchu są bliskie zeru [6].

Problemowi poprawy jakości działania serwonapędów jest poświęconych wiele prac, jednak nie doczekał się on w pełni zadowalającego rozwiązania – zwłaszcza dla niewielkich prędkości ruchu i minimalnych przemieszczeń [2-5,8,9,11-15].

W referacie jest przedstawiony algorytm znacznie poprawiający dokładności takiego ruchu. Dzięki samonastrajaniu się poprawia on jakość sterowania ruchem osi silnika serwonapędu w bardzo szerokim zakresie zmian obciążeń statycznych i dynamicznych.

Skuteczność działania opisanego w referacie algorytmu zbadano na drodze symulacji komputerowych, w których wykorzystano model cyfrowego serwonapędu ACOPOS firmy Bernecker & Rainer.

Wyniki symulacji komputerowych pokazują, że przedstawiany algorytm także poprawia jakość sterowania wykorzystujących silniki szeregowe a więc prawdopodobnie – po pewnych modyfikacjach - może być zastosowany w układach napędowych elektrycznych pojazdów szynowych.

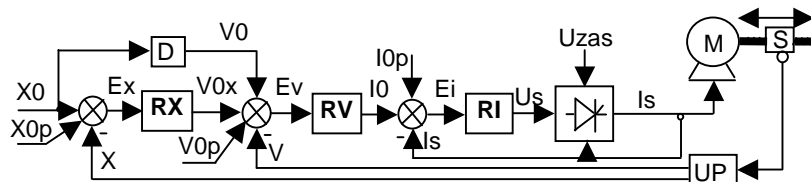
Obecnie trwają badania możliwości zastosowania przedstawianego algorytmu do poprawy jakości działania serwonapędów z silnikami liniowymi.

### **Struktura badanego serwonapędu**

W typowym współczesnym cyfrowym serwonapędzie ruchem osi silnika steruje kaskada trzech regulatorów: położenia (RX), prędkości (RV) i prądu (RI) uzupełniona o tor prędkościowego sprzężenia typu feed-forward oraz zasilacz energoelektroniczny pełniący funkcję ogranicznika prądu pobieranego przez silnik [1].

Ze względu na znaczącą pozycję serwonapędów ACOPOS firmy B&R - na potrzeby opisanych w referacie badań - stworzono komputerowy symulator tego serwonapędu. Wszystkie jego regulatory są typu PI z tzw. antywindup-em akcji całkującej [1]. Można do nich także dodać pomocniczą wartość zadaną, co umożliwiłoby użycie opisywanego w referacie algorytmu poprawy jakości sterowania powolnym ruchem. Strukturę

serwonapędu ACOPOS napędzającego sanie obrabiarki poruszone przez silniki obrotowy i toczną przekładnią śrubową pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura klasycznego serwonapędu: RX - regulator położenia, RV - regulator prędkości, RI - regulator prądu, UP - układ pomiaru położenia i prędkości san obrabiarki, D - blok różniczkowania, M - silnik serwonapędu, S - sanie obrabiarki, X, X0 i X0p - aktualne oraz główne i pomocnicze zadane położenie san, V, V0 i V0p - aktualna oraz główna i pomocnicza zadana prędkość ruchu, I0, I0p i Is - główny i pomocniczy prąd zadany oraz prąd pobierany przez silnik, Uzas - napięcie zasilania, Ex, Ev i Ei - uchyby położenia, prędkości i prądu

Wraz z regulatorem położenia w serwonapędzie ACOPOS wykorzystywane jest prędkościowe sprzężenie typu feed-forward. Okres skanowania poszczególnych pętli sterowania serwonapędu ACOPOS wynosi dla: regulatora położenia - 400  $\mu$ s, regulatora prędkości - 200  $\mu$ s, regulatora prądu - 100  $\mu$ s a ponadto, co 400  $\mu$ s można - poprzez łącze cyfrowe - zmieniać wartość czterech wybranych parametrów tych regulatorów [1].

Wykorzystując możliwość zmiany on-line podczas pracy serwonapędu wartości czterech wybranych jego parametrów w pierwszej fazie badań zmodyfikowano sposób działania akcji całkującej regulatora położenia zerując ją, gdy przy zerowej prędkości zadanej uchyb położenia ma wartość zerową lub zmienia znak. Dzięki temu zmniejszyły się przeregulowania podczas dużych zmian zadanego położenia, jednak w dalszym ciągu jakość sterowania przy niewielkich skokowych zmianach zadanego położenia oraz podczas ruch z niewielkimi prędkościami zadanymi była niezadowolająca [2].

#### Model silnika i obciążenia serwonapędu

Zapewnienie wysokiej dokładności sterowania ruchem w szerokim zakresie prędkości i przyspieszeń jest trudne gdyż masa przedmiotu przemieszczanego przez serwonapęd obrabiarkowy może być różna i zmienna podczas trwania ruchu [6,7]. Oznacza to, bowiem także zmienność spowodowanego do osi silnika wypadkowego momentu bezwładności ( $J_p$ ) oraz momentu hamującego ( $M_h$ ). Uzyskanie wysokiej dokładności sterowania jest szczególnie trudne podczas ruchu z niewielkimi prędkościami oraz podczas zmiany kierunku ruchu, gdyż w tych warunkach dominujące znaczenia ma silnie degresywnie nieliniowe tarcie statyczne [6,15]. Sterowanie utrudnia także nasycanie się obwodu magnetycznego silnika, nieliniowości regulatorów oraz dynamiczne ograniczanie wartości prądu pobieranego przez silnik [6,15].

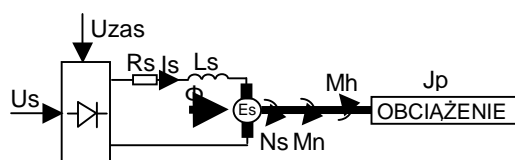
Nieliniowość oraz złożoność wyżej wymienionych czynników była powodem, dla którego poszukiwanie sposobu poprawy jakości pracy serwonapędu oparto na analizie wyników symulacji komputerowych układu sterowania serwonapedem.

W komputerowym symulatorze wykorzystano - pokazany na rysunku 2 - model silnika prądu stałego z wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi oraz blokiem energoelektronicznego zasilacza ograniczającego wartość prądu wirnika [7,15].

Aby uwzględnić podczas symulacji wpływ temperatury na właściwości serwonapędu przyjęto, że współczynnik temperaturowy rezystancji wirnika wynosi  $0,00393K^{-1}$ , strumienia magnetycznego wynosi  $-0,001K^{-1}$  oraz  $-0,0025K^{-1}$  dla tarcia spoczynkowego i  $-0,001K^{-1}$  dla tarcia tocznego [15]. Podczas symulacji badano wpływ na jakość

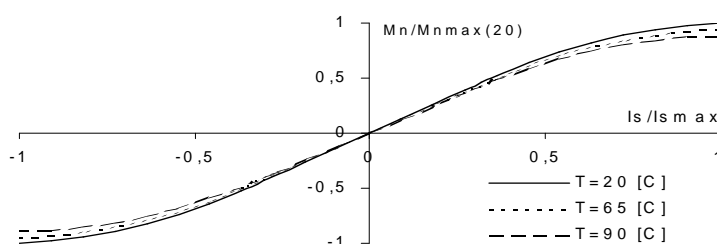
## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

sterowania zmian temperatury uzwojeń w zakresie od 10°C do 110°C, magnesów od 10°C do 90°C] oraz ułożyskowania w zakresie od 10°C do 60°C.

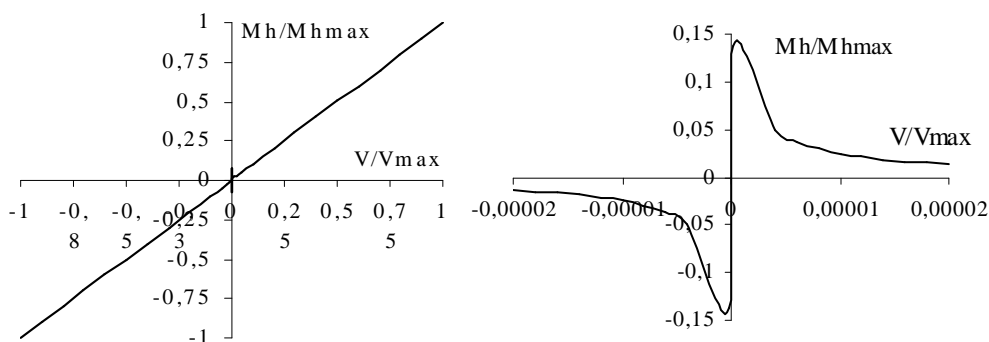


Rys. 2. Schemat zastępczy wykorzystanego w symulatorze silnika wraz z energoelektronicznym zasilaczem;  $U_s$  – sygnał sterujący,  $U_{zas}$  – napięcie zasilania,  $J_p$  – sprowadzony do osi silnika moment bezwładności przemieszczanych mas,  $N_s$  – prędkość obrotowa silnika,  $M_n$  i  $M_h$  – moment napędowy i hamujący,  $\Phi$  i  $E_s$  – strumień magnetyczny i siła przeciwelektromotoryczna,  $R_s$  i  $L_s$  rezystancja i indukcyjność obwodu wirnika,  $I_s$  – prąd w obwodzie wirnika

Na rysunkach 3 – 4 pokazano charakterystyki względnego momentu napędowego silnika i sprowadzonego do wału silnika względnego własnego momentu hamującego ruch osi silnika serwonapędu (bez obciążenia przemieszczanym przedmiotem).



Rys. 3. Charakterystyka względnego momentu napędowego zamodelowanego silnika serwonapędu



Rys. 4. Charakterystyka sprowadzonego do wału silnika względnego własnego momentu hamującego zamodelowanego serwonapędu

Podczas badań sprawdzano skuteczność działania przedstawianego algorytmu sterowania symulując przemieszczanie przez silnik serwonapędu przedmiotu o masie mp. W tabelicy 1 podano jak masa mp zmieniała sprowadzony do osi silnika względny

moment bezwładności ( $J_p$ ), względny maksymalny opór tarcia spoczynkowego ( $M_{hsmax}/M_{nmax}$ ) oraz względną maksymalną prędkość ( $V_{pmax}/V_{max}$ ) ruchu przemieszczanego przedmiotu. Znaczne zmniejszenie maksymalnej prędkości ruchu z przedmiotem o  $m_p=10,0$  wynika z ograniczenia wartości pobieranego prądu.

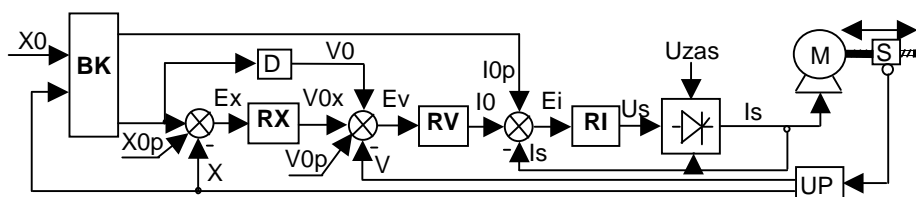
Tablica 1. Wpływ masy przemieszczanego przedmiotu na wybrane parametry serwonapędu

$m_p$	$J_p$	$M_{hsmax}/M_{nmax}$	$V_{pmax}/V_{max}$
0,0	1	0,073	1,000
1,0	3	0,146	0,684
10,0	21	0,804	0,018

### Algorytm zwiększający dokładność sterowania powolnym ruchem serwonapędu

Na jakość sterowania podczas ruchu z niewielką prędkością zadaną ( $V_0$ ) lub minimalną zmianą zadanej pozycji ( $X_0$ ) największy wpływ ma tarcie statyczne [7,15]. Degresywna charakterystyka momentu oporowego tego tarcia (rys.4) powoduje bowiem powstanie wówczas oscylacji położenia osi silnika - co pokazano na rysunkach  $x - y$ .

Wyniki symulacji pokazują, że znaczącą poprawę jakości ruchu z niewielkimi prędkościami można uzyskać dodając do pierwotnej struktury serwonapędu blok BK korygujący wartość zadaną regulatora prądu – rysunek 5.

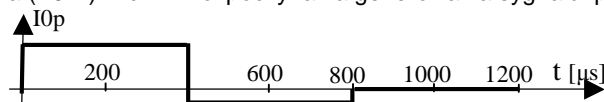


Rys. 5. Struktura zmodyfikowanego serwonapędu: BK – blok korekcji wartości zadanej regulatora prądu, pozostałe oznaczenia jak na rys. 1

Blok korekcji wartości zadanej prądu silnika (BK) generuje trwający 1200  $\mu s$  sygnał korygujący ( $I_{0p}$ ) o przebiegu pokazanym na rysunku 6, jeśli spełniony jest warunek:

$$((|X_0 - X| \geq Ex_{gran}) \text{ AND } (|\Delta X| \leq V_{gran})) \quad (1)$$

Wartość pierwszego impulsu ( $I_{0p1}$ ) sygnału korygującego  $I_{0p}$  ma taki sam znak jak znak uchybu położenia ( $X_0 - X$ ) w chwili rozpoczynania generowania sygnału  $I_{0p}$ .



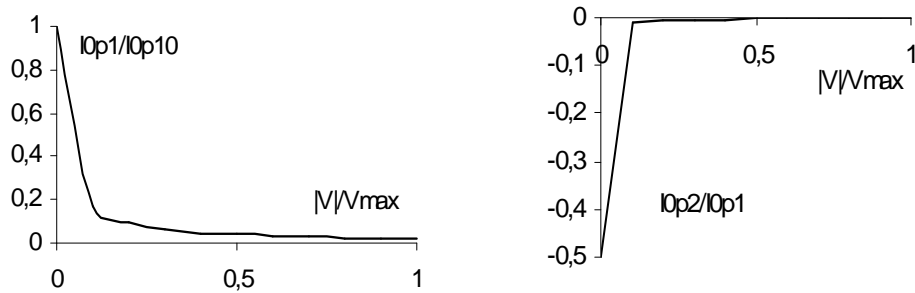
Rys. 6. Przebieg sygnału  $I_{0p}(t)$  generowanego przez blok BK gdy  $(X_0 - X) > 0$

Amplituda obu impulsów sygnału korekcyjnego zależy od prędkości ruchu i wyznaczonej przez procedurę samonastrajania amplitudy  $I_{0p10}$  pierwszego impulsu wymuszającego rozpoczęcie ruchu zatrzymanego serwonapędu – rysunek 7.

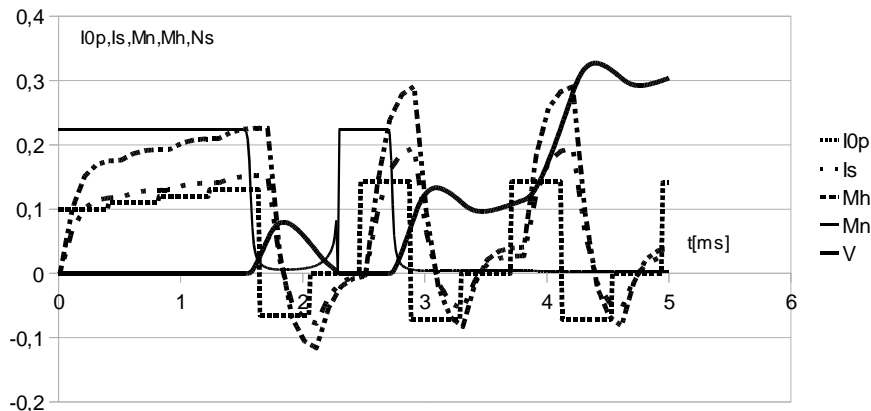
Procedura samonastrajania utrzymując stałą minimalną wartość zadanego położenia (jest to parametr procedury samo nastrajania) generuje sygnał korekcyjny ( $I_{0p}$ ) rosnący

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

schodkowo (z krokiem 400 [μs]) aż do chwili gdy wirnik silnika serwonapędu zacznie się obracać. Przebiegi względnych wartości prądu, napięcia, momentów napędowego i hamującego oraz prędkości ruchu sań podczas trwającego 1,65 [MS] samonastrajania bloku korekcji (BK) pokazano na rysunku 8.



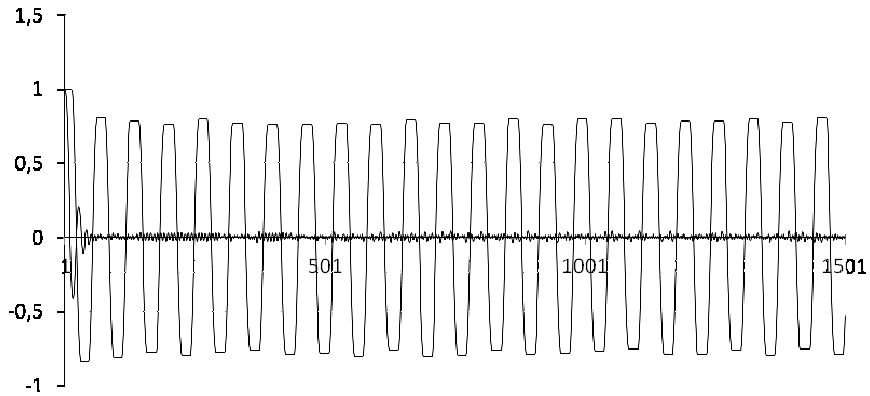
Rys. 7. Zależność amplitudy obu impulsów sygnału korygującego od prędkości ruchu serwonapędu



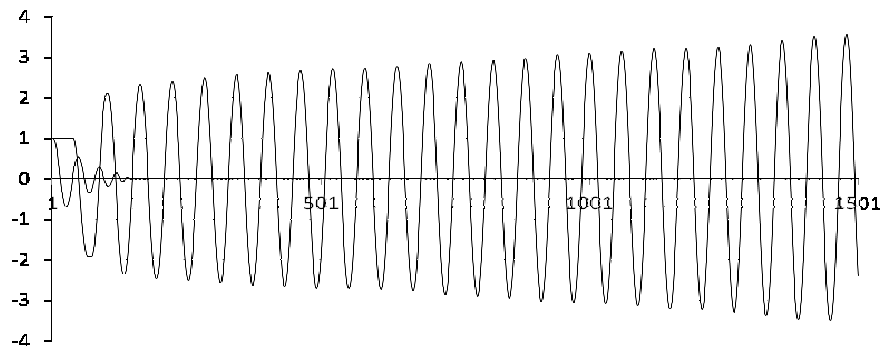
Rys. 8. Przebiegi względnych wartości: sygnału korygującego wartość zadaną regulatora prądu, prądu silnika  $I_s$ , momentu napędowego  $M_n$  i hamującego  $M_h$  silnik oraz prędkości  $V$  ruchu sań

Na rysunkach 9 – 14 pokazano przebiegi błędu położenia ( $E_x$ ) przed i po zastosowaniu bloku korekcji podczas sterowania ruchem serwonapędu po skokowej zmianie zadanego położenia o 0,001 mm oraz podczas ruchu ze stałą prędkością zadaną  $V_0=0,001$  mm/s.

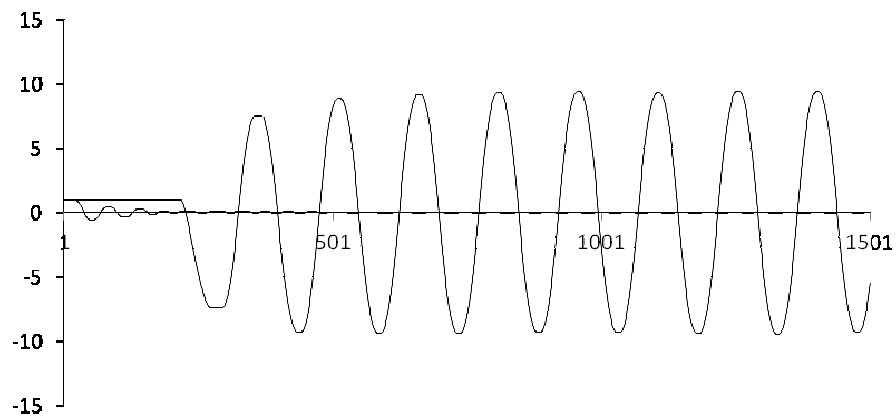
Podczas wszystkich (pokazanych na rysunkach 9-14) symulacji wartości nastaw regulatora położenia (RX), prędkości (RV) i prądu (RI) były jednakowe – optymalne dla ruchem serwonapędu nieobciążonego serwonapędu ( $m_p=0,0$ ) z dużymi prędkościami. Poprawa jakości sterowania powolnym ruchem serwonapędu jaką uzyskano po zastosowaniu opisanego algorytmu korekcyjnego jest bardzo duża a fakt, że nie wymagała ona zmiany wartości nastaw regulatorów składowych serwonapędu jeszcze bardziej zwiększa atrakcyjność przedstawianego rozwiązania.



Rys. 9. Uchyb nadążania z  $mp=0.0$  podczas pierwszych 1500 ms po skokowej zmianie zadanego położenia o  $X0 = 0.001$  mm; z  $dI0p$  - przebieg zanikający, bez  $dI0P$  - przebieg z oscylacjami

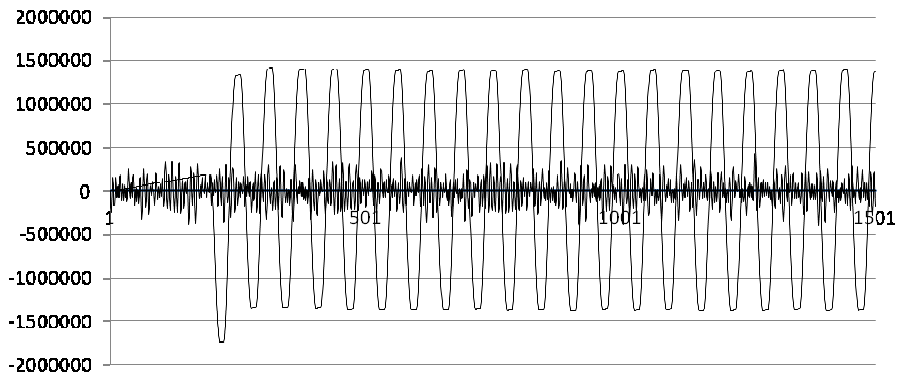


Rys. 10. Uchyb nadążania z  $mp=1.0$  podczas pierwszych 1500 ms po skokowej zmianie zadanego położenia o  $X0 = 0.001$  mm; z  $dI0p$  - przebieg zanikający, bez  $dI0P$  - przebieg z oscylacjami

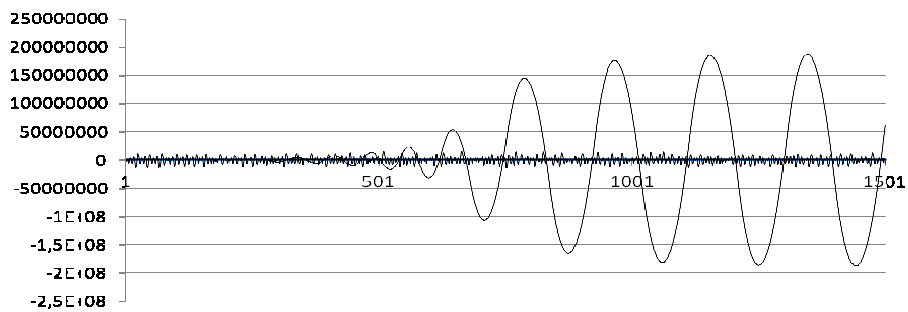


Rys. 11. Uchyb nadążania z  $mp=10.0$  podczas pierwszych 1500 ms po skokowej zmianie zadanego położenia o  $X0 = 0.001$  mm; z  $dI0p$  - przebieg zanikający, bez  $dI0P$  - przebieg z oscylacjami

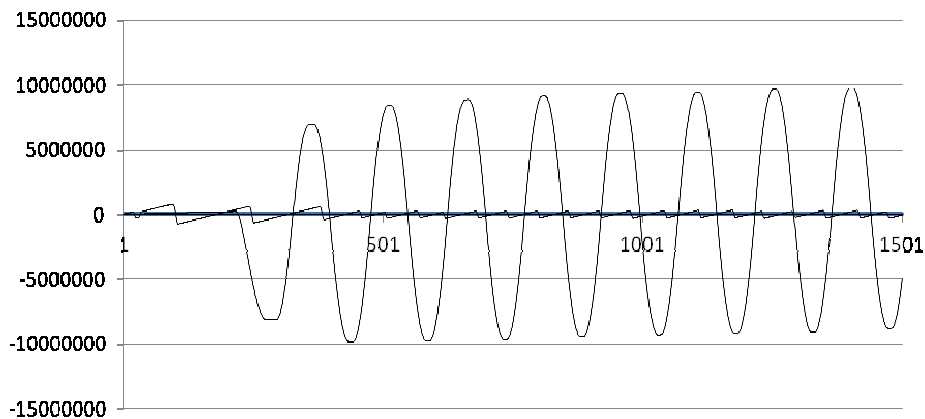
**VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012**



Rys. 12. Uchylb nadażania dla  $mp=0.0$  podczas ruchu ze stałą prędkości zadana  $V0 = 0.001$  mm/s ; z dI0p - przebieg szybkozmienny powiększony x10, bez dI0P - przebieg z powolnymi oscylacjami



Rys. 13. Uchylb nadażania dla  $mp=1.0$  podczas ruchu ze stałą prędkości zadana  $V0 = 0.001$  mm/s ; z dI0p - przebieg szybkozmienny powiększony x1000, bez dI0P - przebieg z powolnymi oscylacjami



Rys. 14. Uchylb nadażania dla  $mp=10.0$  podczas ruchu ze stałą prędkości zadana  $V0 = 0.001$  mm/s; z dI0p - przebieg szybkozmienny powiększony x10, bez dI0P - przebieg z powolnymi oscylacjami

## Podsumowanie

W referacie przedstawiono prosty sposób poprawy jakości sterowania ruchem serwonapędu przy małych prędkościach zadanych i niewielkich skokowych zmianachadanego położenia. Badania symulacyjne potwierdzają skuteczność opisanego algorytmu w szerokim zakresie zmian obciążenia silnika serwonapędu. W najbliższym czasie planowane jest wykonanie badań praktycznych weryfikujących skuteczność działania opisanego algorytmu. Jeśli wyniki tych prób potwierdzą rezultaty badań symulacyjnych, to wydaje się że opisana w referacie modyfikacja algorytmu sterowania serwonapędu powinna stać się standardowym elementem struktury sterowania cyfrowych serwonapędów.

## Literatura

1. ACOPOS – Users Manual
2. Broel-Plater B.: Sterowanie małymi prędkościami ruchu cyfrowego serwonapędu, XVII Krajowa Konferencja Automatyki KKA"2011, str. 632-641
3. Broel-Plater B.: Wykorzystanie logiki rozmytej do poprawy jakości sterowania cyfrowego serwonapędu, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 2011, nr 2, str. 546-555
4. Chen J.-S., Chen K.-C., Lai Z.-C., Huang Y.-K.: Friction characterization and compensation of a linear-motor rolling-guide stage, *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003), s. 905 – 915
5. Ciliz M. K., Tomizuka M.: Friction modelling and compensation for motion control using hybrid neural network models, *Engineering Application of Artificial Intelligence* 20 (2007), s. 898 – 911
6. Kosmol J.: Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1998
7. Krishnan R.: Motor Drives – Modeling, Analysis and Control, Prentice Hall, 2001
8. Ku S., Larsen G., Cetinkunt S.: *Fast tool servo control for ultra-precision machining at extremely low feed rates*, *Mechatronics* 8 (1998), s. 381-393
9. Lee T. H., Tan K. K., Huang S. N., Dou H. F.: Intelligent control of precision linear actuators, *Engineering Application of Artificial Intelligence* 13 (2000), s. 671 – 684
10. Qin Y.: *Micro-manufacturing Engineering and Technology*, Elsevier, 2010
11. Ro P. I., Shim W., Jeong S.: Robust friction compensation for positioning and tracking for a ball-screw-driven slide system, *Precision Eng.* 24 (2000), s. 160 – 173
12. Ryu J.-H., Song J., Kwon D.-S.: A nonlinear friction compensation method using adaptive control and its practical application to in-parallel actuated 6-DOF manipulator, *Control Engineering Practice* 9 (2001), 159 - 167
13. Sato K., Nakamoto K., Shimokohbe A.: Practical control of precision positioning mechanism with friction, *Precision Engineering* 28 (2004), s. 426 – 434
14. Suh S.-H., Kang S.-K., et al.: *Theory and Design of CNC Systems*, Springer, 2003
15. Younkin G. W.: *Industrial Servo Control Systems – Fundamentals and Applications*, Marcel Dekker Inc., 2003

Praca finansowana w ramach grantu rozwojowego MNiSzW nr N R03-0050-06

**Autor:** dr inż. Bogdan Broel-Plater; Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki, Wydział Elektryczny, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: [bogdan.broel-plater@zut.edu.pl](mailto:bogdan.broel-plater@zut.edu.pl)