

WYBRANE ZAGADNIENIA NOWOCZESNYCH NAPĘDÓW HYDROSTATYCZNYCH

SELECTED PROBLEMS OF MODERN HYDROSTATIC DRIVES

Klaudiusz Klarecki, Mariusz Hetmańczyk, Dominik Rabsztyń – Instytut Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Politechnika Śląska

W artykule przedstawiono porównanie dokładności pozycjonowania serwonapędów hydraulicznych z zaworami proporcjonalnymi różnych klas (z zaworem o podwyższonych parametrach dynamicznych D1FPE01FC9NB00 oraz typowym zaworem proporcjonalnym D1FBB32FC0NJW0) dla wybranych parametrów kinematycznych oraz stanów obciążeń. W obydwu serwonapędach zastosowano zaawansowany kontroler z rodziny Compax3 prod. Parker Hannifin.

The paper presents a comparison of positioning accuracy of hydraulic servodrives with proportional valves of various classes (a D1FPE01FC9NB00 valve of improved dynamics and a typical D1FBB32FC0NJW0 proportional valve) for chosen kinematic parameters and load conditions. In both servodrives an advanced Parker Hannifin Compax3 controller was applied.

Wstęp

Stosowane od wielu lat serwonapędy elektrohydrauliczne charakteryzują się wieloma korzystnymi cechami, jak chociażby możliwością przyjęcia dużej wartości współczynnika wzmocnienia prędkościowego oraz dużą sztywnością. Pomimo tych zalet, użytkownicy niechętnie odnoszą się do serwonapędów hydraulicznych. Jedną z przyczyn może być ich, nieco odmienna od typowych serwonapędów elektrycznych, elektronika. W typowym serwonapędzie elektrohydraulicznym analogowy sygnał sterujący podawany jest albo do modułowego regulatora (najczęściej PID), albo bezpośrednio do karty wzmacniacza serwozaworu z zabudowanym regulatorem PID. Rozwiązanie pierwsze jest stosowane w przypadku układów z zaworami proporcjonalnymi regulacyjnymi, w których wyjście z modułowego regulatora jest sygnałem sterującym dla karty wzmacniacza proporcjonalnego. Ograniczeniami przedstawionych układów są:

- brak skalowalności i trudność rozbudowy/modyfikacji napędów maszyn,
- niemożność bezpośredniego sterowania cyfrowego,
- utrudniona parametryzacja serwonapędów.

Rozwiązaniem powyższych problemów są nowoczesne, zintegrowane systemy napędowe, w których podobnie traktowane są napędy elektryczne i hydrauliczne. Przykładami mogą być systemy IndraMotion firmy BoschRexroth lub Compax3 firmy Parker Hannifin.

Rodzina sterowników Compax3

Sterowniki serwonapędowe Compax3 prod. Parker Hannifin to kontrolery ruchu z wbudowanymi sterownikami PLC z możliwością wizualizacji realizowanych zadań. Wyposażone są w typowe interfejsy cyfrowe (RS232/RS485, Profibus DP, CANopen, Ethernet) oraz wejścia/wyjścia analogowe i cyfrowe. Posiadają dedykowane przyłącza dla typowych układów pomiaru położenia serwonapędu (SSI, EnDat2.1, 1VSS, TTL). Jedną z opcji ich wykorzystywania jest możliwość realizowania elektronicznie synchronizowanych zespołów napędów – tzw.

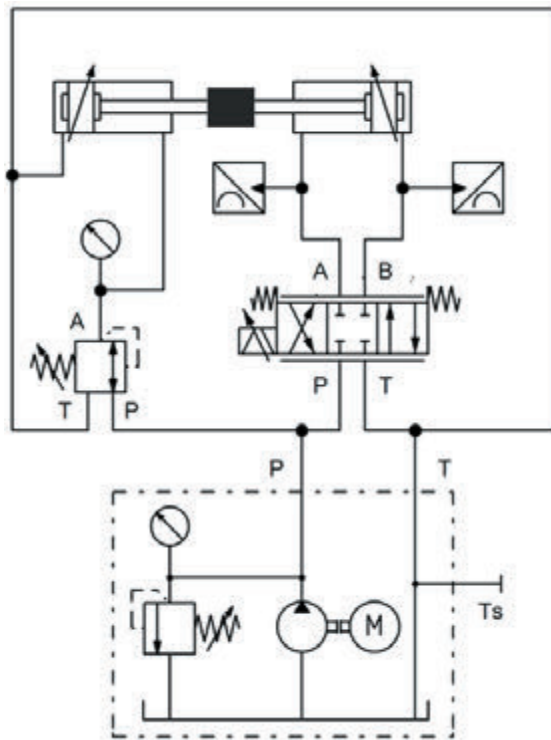
„Electronic Gearbox” i „Electronic Cam”. Sterowniki rodziny Compax3 oferowane są dla napędów elektrycznych małych mocy – Compax3S, dużych mocy – Compax3H oraz do maszyn z wieloma osiami elektrycznymi sterowanymi – Compax3M. Do napędów hydraulicznych dedykowany jest sterownik Compax3F. Różni się od wymienionych wcześniej brakiem „końcówki mocy” w postaci przemiennika częstotliwości (3S i 3H) lub falownika (3M). Wynika to z założenia, że serwozawór lub zawór proporcjonalny, i tak jest, musi być wyposażony we wzmacniacz proporcjonalny, stąd zadaniem sterownika jest wygenerowanie odpowiedniego sygnału sterującego, a nie zasilanie cewek przetwornika elektromechanicznego zaworu.

Sterowniki Compax3F oferowane są w kilku wersjach, przeznaczonych do różnych zastosowań. W tym celu producent dostosował sposoby sterowania, a mianowicie:

- Compax3F...T10... - sterowanie prędkością lub momentem obrotowym/siłą za pomocą sygnału analogowego lub sygnałów krok/kierunek,
- Compax3F...T11... - sterowanie położeniem, prędkością i momentem obrotowym/siłą z wykorzystaniem „tablicy ruchów”, możliwa jest również praca jako „elektroniczna przekładnia”,
- Compax3F...T30... - sterowanie serwonapędem w środowisku CoDeSys (możliwość programowania przy pomocy języków LD, FBD i innych),
- Compax3F...T40... - oferuje możliwości sterownika T30 oraz dodatkowo ma funkcję „elektronicznych krzywek” z możliwością synchronizacji do 32 osi.

Budowa stanowiska laboratoryjnego

Podstawowym elementem stanowiska laboratoryjnego jest zaawansowany sterownik Compax3 FD2F12 I12 T11 M00. Do części elektronicznej należy jeszcze czujnik położenia typu BTL7-E100-M0305-B-S32 zabudowany w serwonapędowym siłowniku dwustronnego działania z jednostronnym tłoczyskiem CHMIXRPF24M-M1100 (średnica tłoka 40 mm, średnica tłoczyska 28 mm, skok tłoka 300 mm) połączonym tłoczyskami z identycznym siłownikiem bez pozycjonowania



Rys. 1. Schemat stanowiska do badania serwonapędu hydraulicznego

tłoka. Obydwa siłowniki osadzone na sztywnej podstawie. Dzięki temu można symulować wpływ zmiennego obciążenia na zachowanie serwonapędu. Zasilanie siłownika serwonapędowego zrealizowano od zaworu proporcjonalnego o polepszonej dynamice D1FPE01FC9NB00 prod. Parker Hannifin. Schemat układu hydraulicznego stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rysunku 2.

Pozostałe elementy układu hydraulicznego to:

- zasilacz z pompą o stałej wydajności z możliwością nastawiania prędkości obrotowej wału pompy (parametry nominalne zasilacza: ciśnienie do 10 MPa, przepływ do 12 dm³/min),

- zawór redukcyjny VM064A06VG15 do zasilania komory tłoczyskowej siłownika obciążającego serwonapęd,
- niezbędne przetworniki ciśnienia, przewody elastyczne dwuoplotowe z szybkozłączkami suchoodcinającymi i inne niezbędne elementy armatury hydraulicznej.

Sterownik Compax3F...T11 M00

Sterownik T11 zaimplementowany w opisywanym serwonapędzie realizuje ruchy lub inne działania zdefiniowane w tzw. tablicy ruchów (Motion Profile Table). Działania inicjowane są w zależności od wersji sterownika T11. Oferowane są cztery warianty:

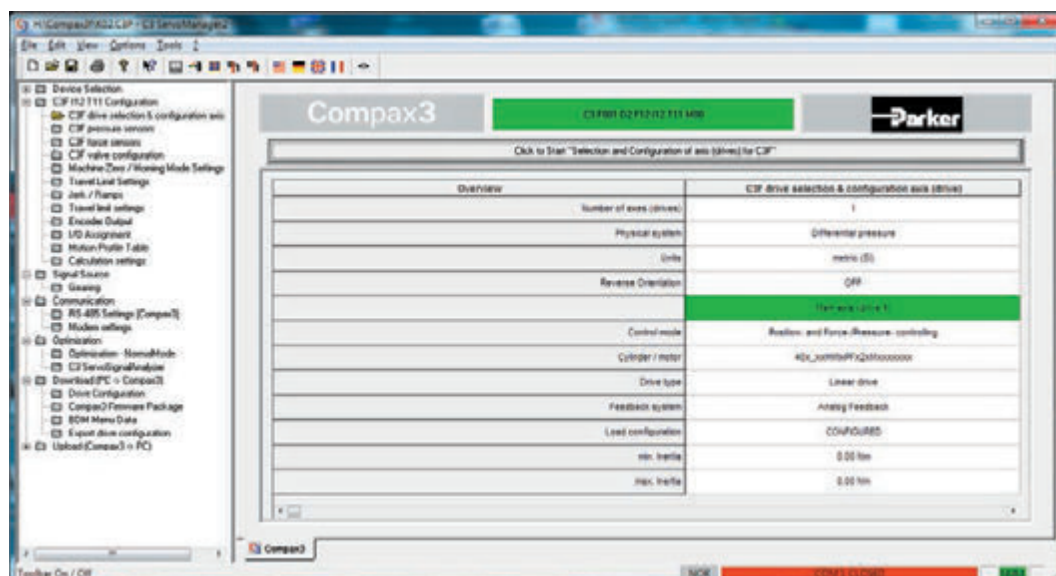
- M00 – standardowy sterownik T11 ze sterowaniem przez interfejs RS232/RS485,
- M10 – sterownik T11 z dodatkowymi wejściami/wyjściami binarnymi i interfejsem HEDA (pozwala na łączenie sterowników Compax3 w celu realizacji elektronicznej przekładni),
- M11 – sterownik T11 z interfejsem HEDA,
- M12 – sterownik T11 z dodatkowymi wejściami/wyjściami binarnymi.

Dodatkowe wejścia binarne w wariantach M10 i M12 wykorzystuje się do aktywizacji napędu (enabled), realizacji bazowania (homing), ręcznego przesuwania (jog+, jog-) i wywoływania zadań zdefiniowanych w tablicy ruchów.

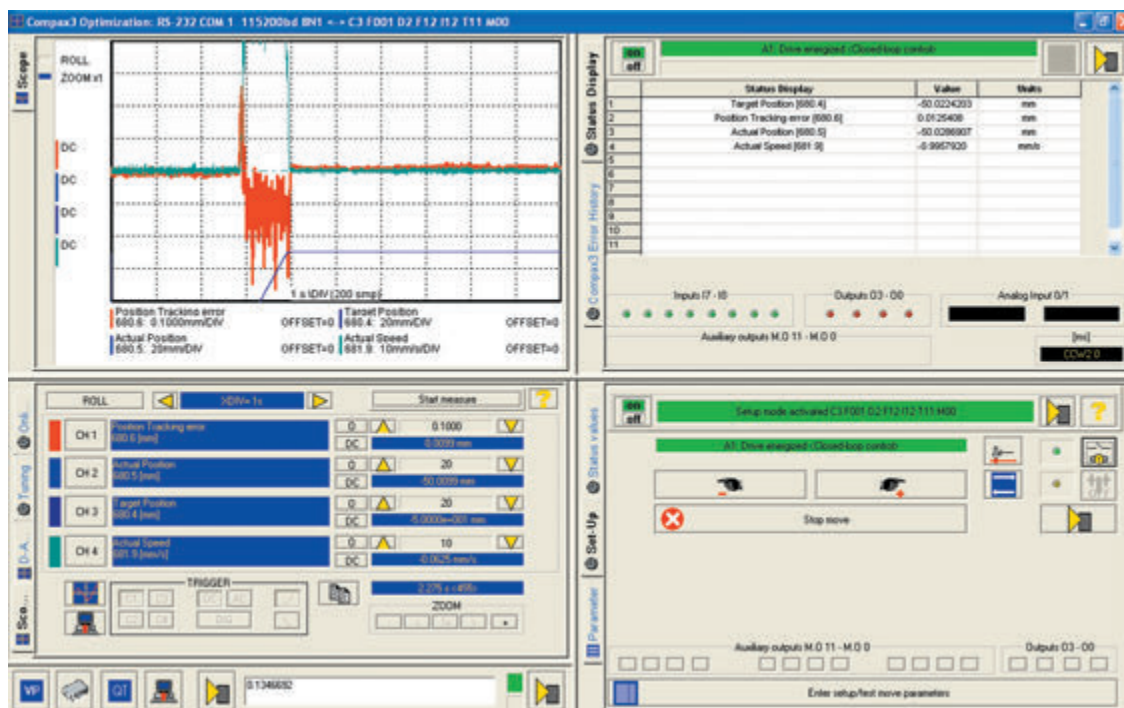
Stanowisko serwonapędu hydraulicznego wyposażono w podstawowy sterownik Compax3F...T11 M00. Wyposażony jest w interfejsy do realizacji sprzężenia położeniowego przy pomocy rezolwera lub enkodera analogowego, podstawowe wejścia/wyjścia binarne, interfejs komunikacyjny RS232/RS485, wejścia i wyjścia analogowe.

Celem uruchomienia zmontowanego serwonapędu, należy sparаметryzować sterownik Compax3F. Komunikacja ze sterownikiem jest realizowana w środowisku C3 ServoManager2 z wykorzystaniem interfejsu szeregowego. W kolejnych krokach konfigurowania napędu należy podać:

- liczbę obsługiwanych serwonapędów (1 lub 2),
- parametry siłownika/silnika hydraulicznego, sposób realizacji pomiaru położenia i konfiguracji mechanicznej napędu,



Rys. 2. Podstawowy ekran programu C3 ServoManager2 z pokazanymi podstawowymi ustawieniami napędu



Rys. 3. Okno „Compax3 Optimization” umożliwiające podgląd stanu napędu oraz aktywizację wybranych funkcji (Homing, Jog, Test, ...)

- informacje o wartościach ciśnień w układzie lub o przetwornikach do pomiaru ciśnień,
- informacje o zastosowanych zaworach proporcjonalnych,
- sposób realizacji bazowania, wartości parametrów ruchów (prędkości, przyspieszenia, szarpnięcia),
- wartości przypisane tablicy ruchu napędu,
- pozostałe informacje na temat układu napędowego.

Przykładowy ekran programu C3 ServoManager2 ze zdefiniowanym napędem pokazano na rysunku 2.

Monitorowanie parametrów sterownika oraz całego serwonapędu umożliwia opcja „Optimization Tool” programu C3 ServoManager2. Po jej włączeniu otwiera się okno podzielone na cztery obszary (rys. 3).

Narzędzie :Optimization Tool” umożliwia:

- podgląd oraz archiwizację wybranych wielkości (np. położenia, prędkości i in.) w czasie pracy napędu (okno Scope),
- podgląd stanów wejść i wyjść sterownika oraz dowolnie wybranych parametrów (okno Status),
- wybór wielkości wyświetlanych w oknie oscyloskopu i zmianę nastaw kontrolera ruchu (wybór przez zakładki),
- wybór parametrów wyświetlanych w oknie stanu, funkcje pomocnicze i serwisowe (Homing, Jog-, Jog+, Test...).

Wpływ zaworu proporcjonalnego na działanie serwonapędu hydraulicznego

Przy analizie wpływu doboru zaworu proporcjonalnego na wybrane cechy serwonapędu skupiono się na badaniu dokładności pozycjonowania dwóch serwonapędów różniących się jedynie zaworem proporcjonalnym. Pierwszy został opisany powyżej, natomiast drugi był jego modyfikacją polegającą na zastąpieniu szybkiego zaworu D1FPE01FC9NB00 zwykłym zaworem proporcjonalnym D1FBB32FC0NJW0. Po wymianie zaworu, ponownie sparametryzowano sterownik Compax3F – zmieniono zdefiniowany dla napędu zawór za pomocą

opcji „C3F valve configuration”. W układzie hydraulicznym wymiana zaworu nie zmieniła jego topologii, schemat pokazany na rysunku 1 pozostał aktualny.

Badania przeprowadzono dla dwóch nastaw ciśnienia w komorze tłoczykowej siłownika obciążającego serwonapęd oraz dla dwóch nastaw prędkości serwonapędu.

Same badania polegały na obserwacji serwonapędu podanego procedurze testowej, polegającej na realizacji ruchów pomiędzy dwoma zdefiniowanymi położeniami z zadanymi: prędkościami ruchu, przyspieszeniem/opóźnieniem i zrywem (jerk).

Przyjęto następujące wartości parametrów kinematycznych:

- zadane położenia: -50 i -100 mm (zero serwonapędu przyjęto dla maksymalnego wysunięcia tłoczyka),
- prędkość ruchu: 10 i 50 mm/s,
- przyspieszenie/opóźnienie: 100 i 500 mm/s²,
- zryw (szarpnięcie): 1000 i 5000 mm/s³.

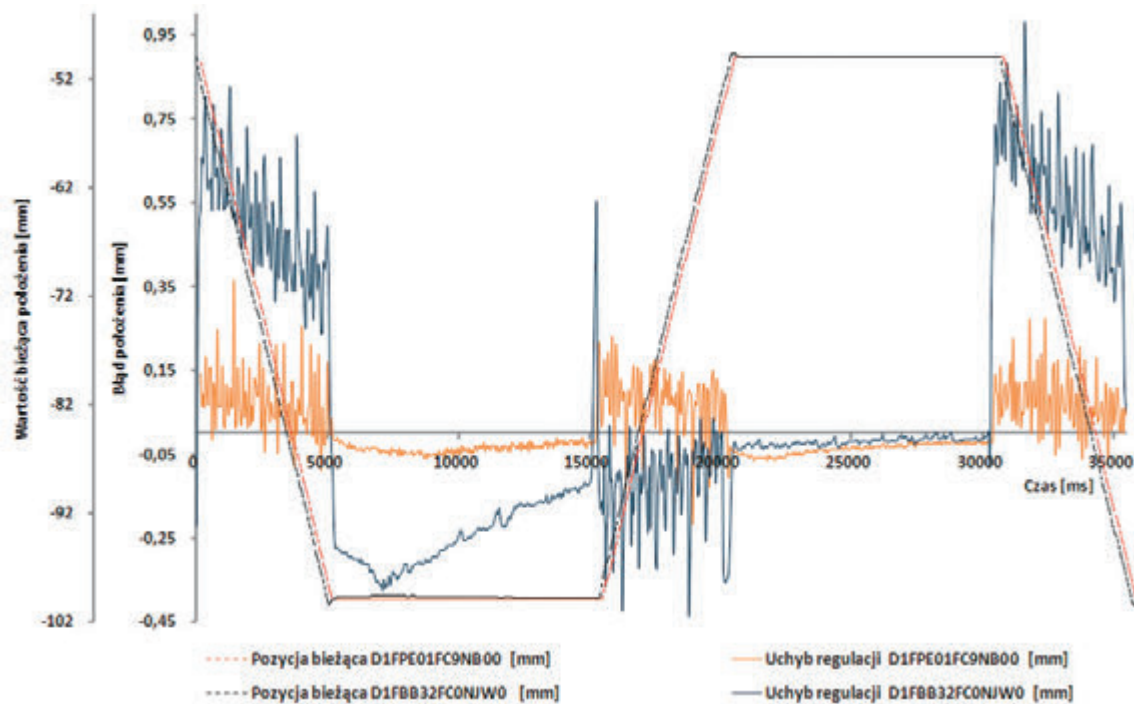
Przebiegi wielkości kinematycznych otrzymane podczas badań pokazano na rysunkach 4 i 5 (bez dodatkowego obciążenia) i rysunkach 6 i 7 (z obciążeniem).

Na wykresach przedstawiono wybrane cykle pracy układu z serwonapędem (z obciążeniem oraz bez obciążenia) przy wsuwaniu oraz wysuwaniu tłoczyka siłownika zasilanego za pośrednictwem analizowanych zaworów proporcjonalnych.

Analiza wyników

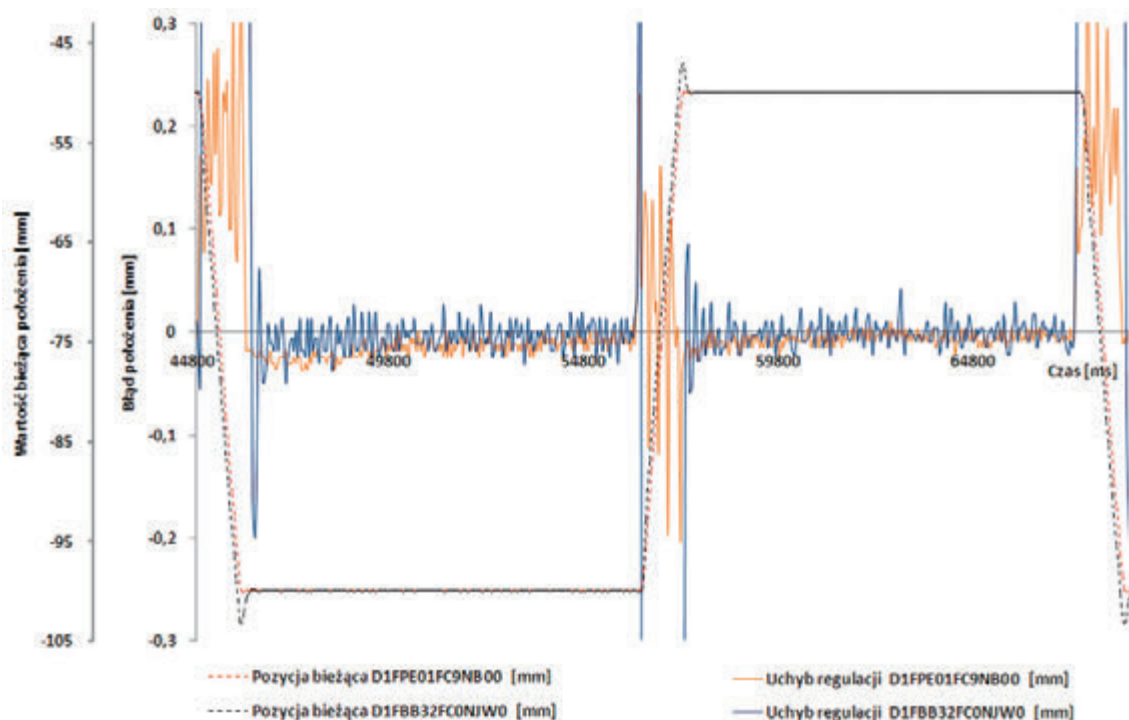
Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów można zdefiniować następujące wnioski:

- wartość błędu pozycjonowania zależy od kierunku ruchu tłoczyka siłownika (wsuwanie lub wysuwanie),
- uzyskanie błędów pozycjonowania o ujemnych wartościach spowodowane jest występowaniem sił tarcia przeciwdzia-

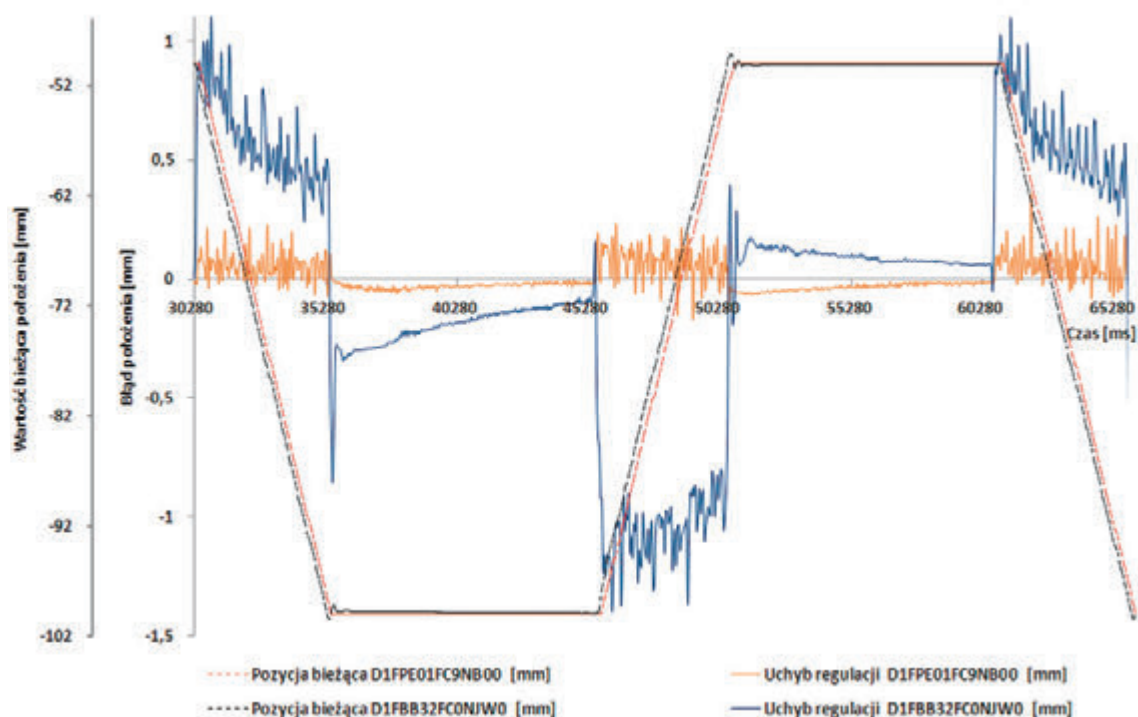


Rys. 4. Przebiegi położenia oraz uchybu regulacji bez dodatkowego obciążenia dla prędkości zadanej 10 mm/s, wartości przyspieszenia 100 mm/s² oraz zrywu 1000 mm/s³

- łąjących osiągnięciu pozycji zadanej – jest to szczególnie widoczne dla przebiegów bez obciążenia zewnętrznego,
- otrzymane przebiegi, w przypadku zaworu D1FBB32FC0NJW0, w których wyraźnie uchyb położeniowy zależy od kierunku najazdu na zadaną pozycję, świadczy o różnych wartościach współczynników wzmocnienia prędkościowego przy ruchach wsuw/wysuw. Jedną z przyczyn może być brak uwzględnienia różnych powierzchni pól czynnych tłoka w siłowniku z jednostronnym tłoczyskiem,
- zwiększenie prędkości wysuwu tłoczyska siłownika (bez obciążenia) dla zaworu D1FBB32FC0NJW0 spowodowało przekroczenie wartości pozycji zadanej oraz oscylacje wartości względem położenia zadanego, zawór D1FPE01FC9NB00 utrzymuje ujemną wartość uchybu regulacji w stanie ustalonym,
- w przypadku wprowadzenia obciążenia zewnętrznego, zawór D1FBB32FC0NJW0 widoczny jest wpływ wzrostu obciążenia zewnętrznego na dokładność pozycjonowania



Rys. 5. Przebiegi położenia oraz uchybu regulacji bez dodatkowego obciążenia dla prędkości zadanej 50 mm/s, wartości przyspieszenia 500 mm/s² oraz zrywu 5000 mm/s³



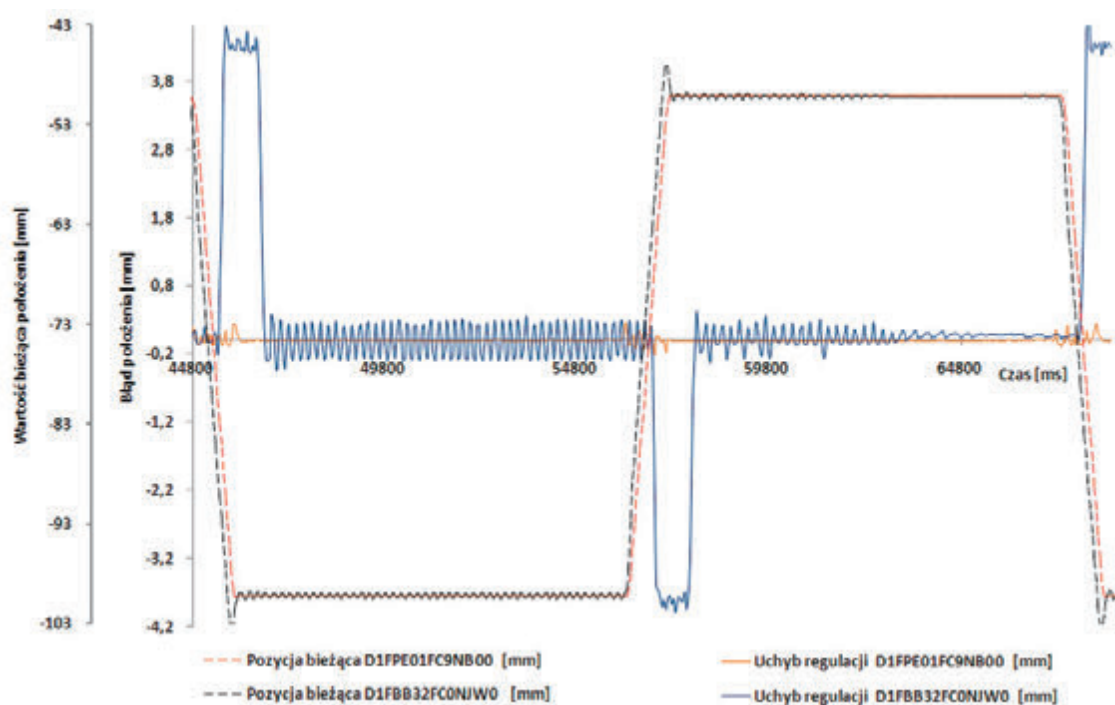
Rys. 6. Przebiegi położenia oraz uchybu regulacji z obciążeniem czynnym o wartości 1300 N dla prędkości zadanej 10 mm/s, wartości przyspieszenia 100 mm/s² oraz zrywu 1000 mm/s³

(zwłaszcza w początkowej fazie działania), natomiast zawór D1FPE01FC9NB00 charakteryzuje się znacznie mniejszą wrażliwością na zmiany obciążenia,

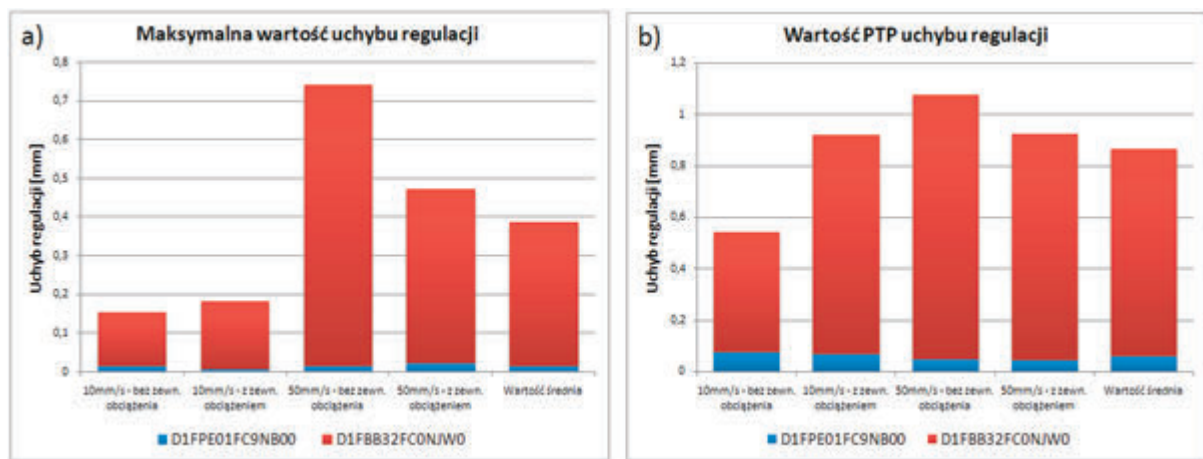
- zwiększenie prędkości wysuwu tłoczyśka obciążonego zewnętrzną siłą czynną powoduje istotne różnice w pracy badanych serwonapędów. Serwonapęd z zaworem typu D1FBB32FC0NJW0 został doprowadzony do granicy stabilności (stała amplituda oscylacji wokół wartości zadanej położenia w przypadku rejestracji błędu pozycjonowania).

Zaistniały fakt można wytłumaczyć przez wysoką wartość wzmocnienia w torze regulacji, wynikającą z konieczności modyfikacji nastaw domyślnych (kryterium minimalizacji wartości błędu pozycjonowania),

- w przypadku wysuwu obciążonego siłownika ze zwiększoną prędkością, zaobserwowano gasnącą amplitudę błędu położenia zaworu D1FBB32FC0NJW0, przy jednoczesnym wyraźnym wzroście wpływu obciążenia zewnętrznego.



Rys. 7. Przebiegi położenia oraz uchybu regulacji z obciążeniem czynnym o wartości 1300 N dla prędkości zadanej 10 mm/s, wartości przyspieszenia 500 mm/s² oraz zrywu 5000 mm/s³



Rys. 8. Porównanie wartości uchybów regulacji: a) maksymalne wartości uchybu regulacji, b) wartości Peak to Peak uchybu regulacji

- zarówno podczas wsuwania, jak i wysuwania obciążonego siłownika, zawór D1FPE01FC9NB00 charakteryzował się stabilną pracą.

Porównanie wartości uchybu regulacji badanych zaworów

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie wartości uchybów regulacji badanych serwonapędów.

Dla serwonapędu z zaworem D1FPE01FC9NB00 maksymalna wartość uchybu regulacji dla zadanej pozycji wynosi od 0,014 mm (przy braku obciążenia zewnętrznego) do 0,023 mm (po nałożeniu obciążenia na serwonapęd). Maksymalna różnica położenia dla zadanej pozycji (Peak to Peak) sygnału uchybu wynosi od 0,067 mm (po obciążeniu układu) do 0,074 mm (bez dodatkowego obciążenia).

Analogicznie wartości maksymalnego uchybu regulacji otrzymane przy zastosowaniu zaworu D1FBB32FC0NJW0 wynoszą wielokrotnie więcej niż w przypadku serwonapędu z zaworem D1FPE01FC9NB00 i wynoszą odpowiednio od 0,14 mm do 0,729 mm (obie wartości odnoszą się do układu bez nałożonego obciążenia zewnętrznego). Maksymalna różnica położenia dla zadanej pozycji (Peak to Peak) sygnału uchybu wynosi od 0,47 mm do 1,028 mm (wartości odnoszą się do układu nieobciążonego).

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań można określić w jakich aplikacjach powinny być stosowane rozdzielacze proporcjonalne z różnych „półek” jakościowych.

Rozdzielacze proporcjonalne o polepszonej dynamice (do grupy, których należy zawór typu D1FPE01FC9NB00, określany przez producenta mianem „rozdzielacza serwo-proporcjonalnego”) umożliwiają budowanie serwonapędów hydraulicznych cechujących się dużą dokładnością i wysoką sztywnością przy jednoczesnym zachowaniu wysokich parametrów kinematycznych napędu. Dzięki temu można spełnić oczekiwania nawet bardzo wymagających użytkowników.

Zwykle zawory proporcjonalne (których reprezentantem był rozdzielacz proporcjonalny typu D1FBB32FC0NJW0) również mogą być stosowane w serwonapędach hydraulicznych, jednak takie rozwiązania mogą być odpowiednie jedynie dla aplikacji, w których zadowalające wartości błędu pozycjonowania są rzędu dziesiątych części milimetra. Takie serwonapędy będzie też cechować znacznie niższa sztywność oraz obniżone parametry kinematyczne.

Jednocześnie należy podkreślić, że bardzo ważne dla tego typu napędów jest właściwe (tj. bardzo precyzyjne) dobranie wartości korekt przekrycia krawędziowego zaworu podczas parametryzacji sterowania w układzie hydraulicznym.

Literatura

- [1] Pizoń A.: Elektrohydrauliczne analogowe i cyfrowe układy automatyki. WNT, Warszawa 1995
- [2] Milecki A., Liniowe serwonapędy elektrohydrauliczne, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003
- [3] Tomasiak E., Klarecki K., „Referat” „REFERAT „, „Barbachowski E.: Serwonapędy w budowie maszyn technologicznych. Hydraulika i Pneumatyka. Nr 1/2009, str. 16-20
- [4] Barbachowski E., Klarecki K.: Sposoby korygowania charakterystyk zaworów proporcjonalnych. Wybrane Problemy Inżynierskie 2011 nr 2, s. 29 – 34
- [5] Materiały firmy Parker Hannifin: Operating instructions Compax3 Fluid I12T11: Control via digital I/Os& COM port. Hydraulics controller http://divapps.parker.com/divapps/eme/EME/Literature_List/DOKUMENTATIONEN/C3FI12T11%20eng.pdf