

# Wpływ układu sterowania na dokładność pozycjonowania oraz czas reakcji roboczego układu elektrohydraulicznego

Wacław Kollek, Tomasz Siwulski, Michał Stosiak

## 1. Wstęp

Dokładność wykonywania ruchów roboczych jest często czynnikiem decydującym o jakości wykonywanych robót. Naturalna tendencja do zwiększania mechanizacji prac budowlanych oraz wydobywczych daje w efekcie zwiększenie wydajności pracy przy jednoczesnym zwiększeniu wymagań dotyczących parametrów ruchu. Znaczną część prac w tych dziedzinach wykonuje się przy pomocy specjalistycznych maszyn i urządzeń. Dużą grupę wśród nich stanowią maszyny zaopatrzone w układ roboczy umiejscowiony na podwoziu gąsienicowym, kołowym lub na nieruchomym stanowisku. Układy robocze tych maszyn są w przeważającej większości napędzane przez hydrostatyczny układ przeniesienia napędu. Popularność hydrostatycznego układu napędowego wiąże się z jego stosunkowo nieskomplikowaną konstrukcją, korzystnym stosunkiem przenoszonych mocy do masy układu, znaczną odpornością na oddziaływanie środowiska pracy oraz nieskomplikowanymi procedurami eksploatacyjnymi i serwisowymi. Sterowanie hydrostatyczne napędzanym układem roboczym w większości spotykanych aplikacji jest realizowane za pomocą układu rozdzielaczy przestawianych bezpośrednio przez operatora. Układ taki nie zapewnia dokładnego pozycjonowania oraz pełnej kontroli nad parametrami ruchu układu roboczego. Zastosowanie elementów sterujących przepływem cieczy, których wielkościami sterującymi są sygnały elektryczne, umożliwi dokonanie korzystnych zmian w układzie sterowania. W niniejszej pracy przedstawiono przykładowe wyniki obrazujące wpływ układu sterowania z zaimplementowanym sprzężeniem zwrotnym ujemnym na parametry ruchu hydrostatycznie napędzanego układu roboczego. Do badań wykorzystano, będący na wyposażeniu Zakładu Napędów

**Streszczenie:** Hydrostatyczny napęd układów roboczych maszyn i urządzeń jest powszechnie spotykany w praktyce inżynierskiej. Charakteryzuje się korzystnym stosunkiem mocy do masy oraz prostą budową. W układach hydrostatycznych napędu układów roboczych jako podstawowe elementy wykonawcze w przeważającej większości wykorzystuje się siłowniki hydrauliczne. Ich prędkość wysuwu uzależniona jest od ilości cieczy dostarczonej do siłownika w jednostce czasu, czyli natężenia przepływu cieczy dostarczonej do siłownika. Parametr ten jest funkcją wielu zmiennych, z których głównymi są ciśnienie pracy oraz moc źródła zasilającego układ. W referacie zamieszczono przykładowe wyniki badań przeprowadzonych na symulatorze napędu liniowego, będącym na wyposażeniu Zakładu Napędów i Automatyki Hydraulicznej Politechniki Wrocławskiej. Symulator ma możliwość zaimplementowania układu sterowania ze

sprzężeniem zwrotnym oraz z możliwością dołączenia sterowników przekształcających sygnał sterujący. Elementem sterowanym jest dwustopniowy serwozawór (dwustopniowy wzmacniacz elektrohydrauliczny) z cewką indukcyjną. Położenie tłoka siłownika jest określane przy pomocy liniowego przetwornika indukcyjnego. Dodatkowo możliwa jest zmiana obciążenia badanego siłownika hydraulicznego. Symulator pozwala więc na empiryczne określenie optymalnej struktury sterowania układem zasilania siłownika w aspekcie między innymi dokładności pozycjonowania oraz czasu reakcji przy różnych oddziaływaniach zewnętrznych. W referacie przedstawiono przykładowy cykl badań symulacyjnych wraz z wynikami w formie wykresów.

**Słowa kluczowe:** układy robocze, napęd hydrostatyczny, pozycjonowanie narzędzia, układ sterowania.

## THE IMPACT OF THE CONTROL SYSTEM FOR THE POSITIONING ACCURACY AND RESPONSE TIME OF THE ELECTROHYDRAULIC WORKING SYSTEM

**Abstract:** *The hydrostatic drive systems of the working machinery and equipment are commonly found in engineering practice. They are characterized by a favorable the power to weight ratio and the simple construction. As the basic actuator elements of the hydrostatic drive systems are used the hydraulic cylinders. Their working speed depends on the amount of liquid supplied to the cylinder in unit time, i.e. the flow rate of liquid supplied to the hydraulic cylinder. The flow rate parameter is a function of many variables, which the main are the work pressure and power of the source supply system.*

*The paper contains examples of the results of studies conducted on the hydrostatic linear drive simulator, which is placed in the Department of Hydraulic*

*Drives and Automation of the Wrocław University of Technology. The simulator is able to implement a system of feedback control and has the possibility to use the controllers for transforming control signal. As The final control element are used the two-stage servovalve. The position of the piston is measured by the induction linear sensor. In addition, it is possible to change the load of the testing hydraulic cylinder. The simulator allows to the empirical determination of the optimal structure of the control system connected with the actuator, based on the terms of the positioning accuracy and the response time at various external loads.*

*The paper presents an example of the simulation tests with results in the form of graphs.*

i Automatyki Hydraulicznej Politechniki Wrocławskiej, symulator liniowego napędu hydrostatycznego. Przykładem maszyn, w jakich mógłby znaleźć zastosowanie przedstawiony układ, są żurawie budowlane, wiertnice przodkowe, wozy do obrywki, spycharki oraz wszystkie inne, w których korzystne jest zwiększenie dokładności wykonywania ruchów roboczych.

## 2. Dokładność pozycjonowania układu roboczego funkcją wielu zmiennych

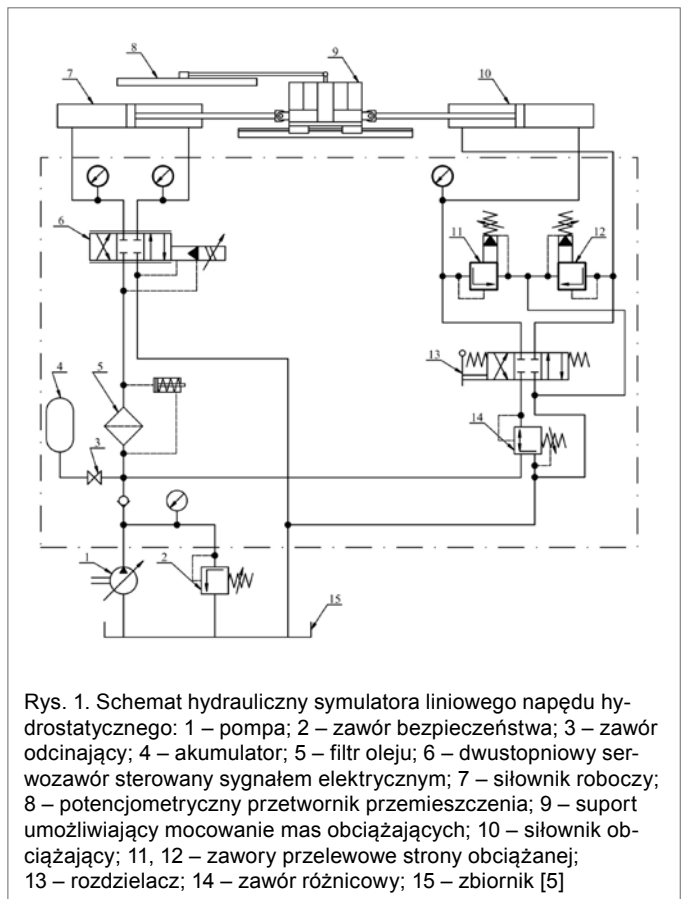
Na dokładność wykonywanych ruchów roboczych hydrostatycznie napędzanego układu roboczego maszyn mają wpływ siły i momenty sił, jakie oddziałują na układ w trakcie pracy. Oddziaływania te można podzielić następująco:

- siły i momenty sił związane z oddziaływaniem zewnętrznym;
- siły i momenty sił bezwładności;
- siły i momenty sił generowane w miejscu połączenia układu roboczego z ramą podstawy;
- siły i momenty sił generowane przez układ napędowy.

W związku z dużą ilością zmiennych w czasie oddziaływań obciążających układ roboczy uzyskanie żądanych parametrów ruchu jest więc zagadnieniem wymagającym analizy złożonego modelu rzeczywistego układu. W praktyce przemysłowej w przeważającej większości to na operatora przerzucona jest odpowiedzialność za prawidłowe prowadzenie narzędzia umieszczonego na układzie roboczym. Stosowane w tym celu układy rozdzielaczy proporcjonalnych pozwalają operatorowi bezpośrednio wpływać na prędkość poszczególnych elementów napędzanych układem hydrostatycznym, a co za tym idzie, również na dokładność pozycjonowania układu roboczego. Zauważyć można zależność, że im dokładniej operator stara się umiejscowić narzędzie w przestrzeni, tym wolniejsze ruchy wykonuje sterowany przez niego układ. Jest to zjawisko naturalne, lecz wpływające niekorzystnie na wydajność pracy. Możliwości psychomotoryczne operatora, nawet poparte długim czasem doświadczenia zawodowego w operowaniu układami roboczymi maszyn, nie umożliwiają uzyskania wysoko wydajnych parametrów ruchu, jakie są spotykane np. w robotach przemysłowych z napędem elektrycznym sterowanym automatycznie.

Połączenie elektronicznego układu sterowania z hydrostatycznym układem napędu otwiera nowe możliwości aplikacji układów sterowania. Zaimplementowanie układu sterującego w układzie napędu hydrostatycznego umożliwi zmiany parametrów ruchu układu bez potrzeby zmian jego konstrukcji lub części składowych. Aby jednak zapewnić prawidłową współpracę układu sterowania z hydrostatycznym układem napędowym, należy określić, jaki rodzaj układu sterowania wpływa korzystnie na parametry pracy wybranego hydrostatycznie napędzanego układu roboczego oraz jakie wartości parametrów nastawnych układu sterowania dadzą w efekcie poprawę parametrów ruchu.

Analiza rzeczywistego hydrostatycznie napędzanego układu roboczego z dużą ilością stopni swobody jest trudnym zadaniem, gdyż prawidłowe zamodelowanie wszystkich oddziaływań wiąże się z koniecznością opracowania skomplikowanego modelu matematycznego. Analogicznym sposobem określenia parametrów pracy układu jest wykorzystanie symulatorów napędu. Symulatory te umożliwiają określenie zależności występujących w układach roboczych w mniejszej skali, a po ich zidentyfikowaniu i zweryfikowaniu zaimplementowanie korzystnych rozwiązań w rzeczywistych obiektach. Przykładem



Rys. 1. Schemat hydrauliczny symulatora liniowego napędu hydrostatycznego: 1 – pompa; 2 – zawór bezpieczeństwa; 3 – zawór odcinający; 4 – akumulator; 5 – filtr oleju; 6 – dwustopniowy serwowzór sterowany sygnałem elektrycznym; 7 – siłownik roboczy; 8 – potencjometryczny przetwornik przemieszczenia; 9 – suport umożliwiający mocowanie mas obciążających; 10 – siłownik obciążający; 11, 12 – zawory przelewowe strony obciążanej; 13 – rozdzielacz; 14 – zawór różnicowy; 15 – zbiornik [5]

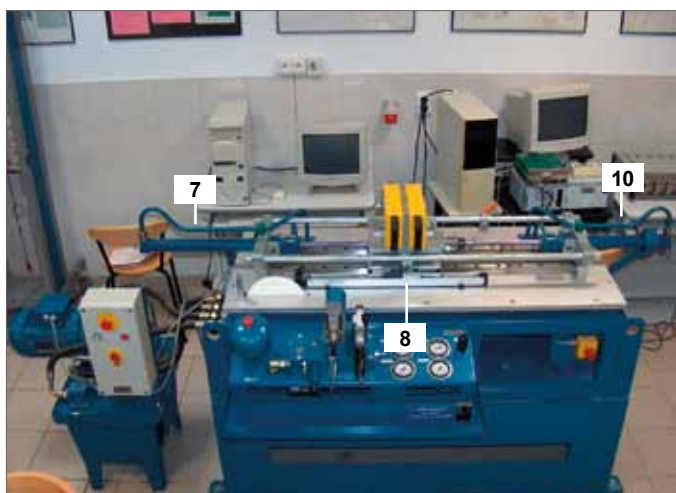
tego symulatora jest, będący na wyposażeniu Zakładu Napędów i Automatyki Hydraulicznej Politechniki Wrocławskiej, symulator napędu liniowego Hydropax Zy25 produkcji firmy Mannesmann Rexroth AG.

## 3. Opis symulatora

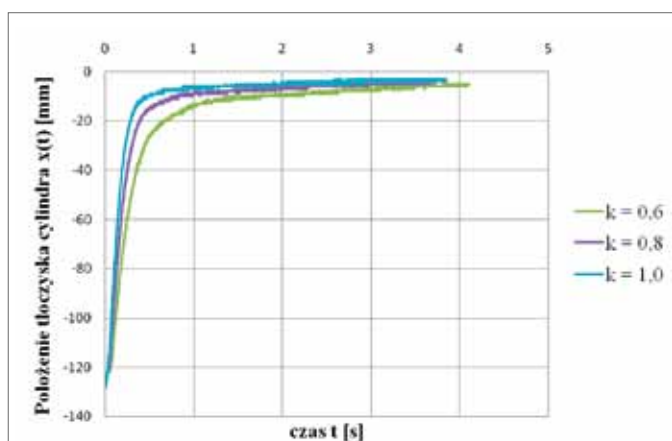
Symulator napędu liniowego Hydropax Zy25 produkcji firmy Mannesmann Rexroth AG składa się z następujących podstawowych elementów [1, 5]:

- pompy łopatkowej zmiennej wydajności;
- serwowzoru dwustopniowego (dwustopniowy wzmacniacz elektrohydrauliczny) wyposażonego w element elektroniczny 4WSE2EM10 produkcji Mannesmann Rexroth;

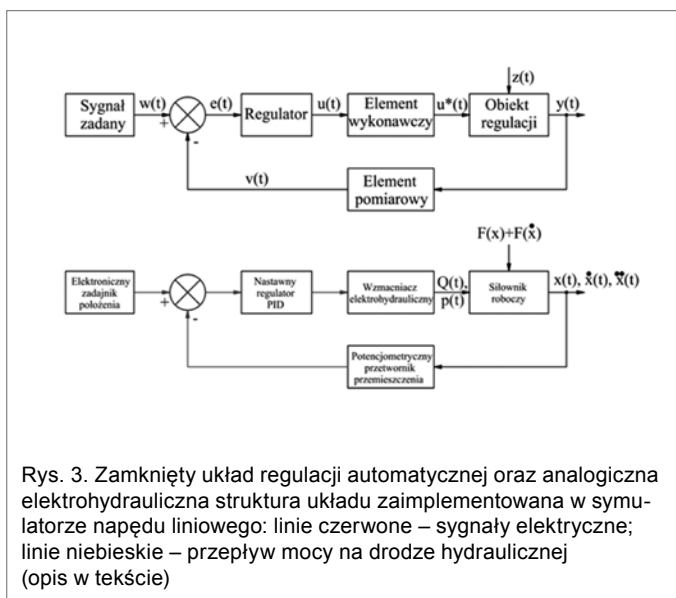
reklama



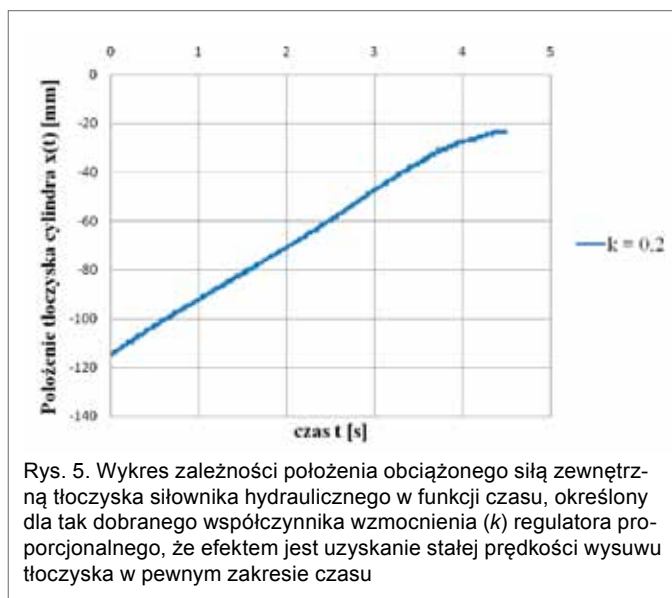
Rys. 2. Symulator elektrohydraulicznego napędu liniowego z zaznaczeniem wybranych elementów. Oznaczenia odpowiadają opisowi pod rys. 1



Rys. 4. Wykres zależności położenia obciążonego siłą zewnętrzną tłoczyska siłownika hydraulicznego w funkcji czasu, określony dla różnych parametrów współczynnika wzmocnienia ( $k$ ) regulatora proporcjonalnego



Rys. 3. Zamknięty układ regulacji automatycznej oraz analogiczna elektrohydrauliczna struktura układu zaimplementowana w symulatorze napędu liniowego: linie czerwone – sygnały elektryczne; linie niebieskie – przepływ mocy na drodze hydraulicznej (opis w tekście)



Rys. 5. Wykres zależności położenia obciążonego siłą zewnętrzną tłoczyska siłownika hydraulicznego w funkcji czasu, określony dla tak dobranego współczynnika wzmocnienia ( $k$ ) regulatora proporcjonalnego, że efektem jest uzyskanie stałej prędkości wysuwu tłoczyska w pewnym zakresie czasu

- siłownika roboczego dwustronnego działania CDE 160-32/22 produkcji Mannesmann Rexroth;
- siłownika obciążającego dwustronnego działania CDE 160-32/22 produkcji Mannesmann Rexroth;
- potencjometrycznego przetwornika przemieszczenia;
- układu zaworów redukujących ciśnienie wraz z rozdzielaczem sterowanym ręcznie, służącym do sterowania oraz zmiany parametrów pracy siłownika obciążającego;
- urządzenia sterującego SYHCE 1.

Symulator jest wyposażony w elektroniczny moduł sterujący, sprzężony z hydrostatycznym układem napędowym. Schemat zastosowanego do badań układu sterowania z zaimplementowanym ujemnym sprzężeniem zwrotnym, czyli układu regulacji automatycznej, przedstawiony jest na rys. 3. Regulator zastosowany w systemie jest elementem programowalnym, co umożliwia zaimplementowanie regulatorów podstawowych typu: proporcjonalnego (P), całkującego (I), inercyjnego I rzędu (T1) oraz różniczkującego (D), których jednoczesne załączenie umożliwia uzyskanie regulatora typu PID, szeroko rozpowszechnionego w praktyce przemysłowej. System umożliwia również imple-

mentację dowolnego złożenia wymienionych członów podstawowych regulatora. Dodatkową cechą przedstawionego układu regulacji jest możliwość określenia parametrów regulatora w dowolnym zakresie. Przedstawione powyżej cechy umożliwiają zaimplementowanie w symulatorze szerokiego spektrum typów regulatorów z praktycznie dowolnymi parametrami, określenie ich wpływu na parametry ruchu siłownika, co w następnym kroku umożliwia przeprowadzenie procesu optymalizacji typu oraz nastaw regulatora w odniesieniu do wymagań stawianych układowi napędu hydraulicznego.

W przedstawianym układzie regulacji sygnał zadany  $w(t)$  jest sygnałem elektrycznym generowanym w elektronicznym zadajniku położenia. Układ umożliwia podłączenie na wejściu sygnału zadanego dowolnego urządzenia, co pozwala na zastosowanie dowolnego zmiennego w czasie sygnału. W symulatorze następuje wyznaczenie wielkości uchybu  $e(t)$ , który to sygnał jest przekazywany do regulatora. Regulator przekształca sygnał uchybu zgodnie ze swoimi nastawami, podając na wyjściu sygnał sterujący elementem wykonawczym  $u(t)$ . W przypadku symulatora elementem wykonawczym jest dwustopniowy ser-

wozawór, którego nastawa steruje natężeniem przepływu cieczy  $Q(t)$  pod ciśnieniem występującym w układzie  $p(t)$ . Parametry przepływu mają bezpośredni wpływ na obiekt regulacji, czyli w przypadku tej implementacji hydrauliczny siłownik roboczy. Na siłownik roboczy oddziałują zarówno obciążenia wewnętrzne (siła tarcia, opory przepływu cieczy), jak i siły zewnętrzne, których wartość w tym przypadku jest zależna od prędkości przemieszczenia się tłoka  $F(\dot{x})$  oraz jego wysunięcia  $F(x)$ . Parametry zewnętrzne obciążające siłownik roboczy można definiować w układzie w pewnym ograniczonym zakresie. W efekcie uzyskiwany jest ruch tłoczyska o określonym przemieszczeniu  $(t)$ , prędkości  $\dot{x}(t)$  oraz przyspieszeniu  $\ddot{x}(t)$ . Wartość przemieszczenia tłoczyska siłownika mierzona jest przy pomocy potencjometrycznego przetwornika, którego elektryczny sygnał wyjściowy jest porównywany w sumatorze z sygnałem zadany.

#### 4. Przykładowe wyniki symulacji

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki symulacji ruchu obciążonego siłownika hydraulicznego, sterowanego za pomocą dwustopniowego serwozaworu (dwustopniowego wzmacniacza elektrohydraulicznego), będącego elementem przedstawionego powyżej zamkniętego układu regulacji ze sprzężeniem zwrotnym ujemnym. Wyniki przedstawiają charakterystykę wyjściową układu regulacji z regulatorem proporcjonalnym ( $P$ ) przy różnych ustawieniach współczynnika wzmocnienia sygnału. Siłownik roboczy był obciążony siłą generowaną za pomocą siłownika obciążającego oraz masą zwiększającą wpływ sił bezwładności. W położeniu początkowym tłoczysko siłownika roboczego było wsunięte. Przetwornik przemieszczenia zastosowany w układzie posiada zakres sygnału wyjściowego od 10 V do +10 V. Sygnał zadany był generowany skokowo od wartości napięcia odpowiadającej całkowitemu wsunięciu tłoczyska siłownika do wartości równej 0 V. W efekcie układ regulacji dążył do uzyskania położenia, w którym tłoczysko było wysunięte do połowy wartości skoku siłownika. Zatem położeniem wyjściowym tłoczyska było jego cofnięcie na długości 127 mm, natomiast wartością zadaną – położenie odpowiadające przesunięciu o tę wartość.

Na wykresach można zaobserwować charakterystyczne dla zastosowania sterownika proporcjonalnego zachowanie się układu automatycznej regulacji oraz wpływ współczynnika wzmocnienia, czyli nastawnego parametru regulatora proporcjonalnego, na przebieg ruchu tłoczyska siłownika roboczego. Wykresy pokazują jednocześnie, jak znacząco zmiana jednego, wybranego do badań, parametru regulatora wpływa na charakter ruchu tłoczyska siłownika przy takich samych warunkach pracy.

#### 5. Podsumowanie

Przedstawiona aplikacja systemu automatycznej regulacji hydrostatycznie napędzanego układu roboczego wraz z zamieszczonymi przykładowymi wynikami symulacji pracy powstałego w ten sposób układu elektrohydraulicznego wskazują, że celowe wydaje się prowadzenie dalszych prac w tym kierunku. Badania wstępne pozwalają stwierdzić, że zastosowanie automatycznej regulacji w sterowaniu hydrostatycznie napędzanymi układami roboczymi maszyn umożliwi zwiększenie ich wydajności oraz dokładności wykonywanych czynności. Zastosowanie przedstawionego symulatora napędu liniowego umożliwi

już podczas badań laboratoryjnych określenie najkorzystniejszej konfiguracji układu sterowania oraz dobór wartości parametrów regulatorów. Pozwala to na skrócenie czasu testów elektronicznego układu sterowania na obiekcie rzeczywistym oraz oszacowanie stopnia poprawy parametrów ruchowych układów roboczych wyposażonych w ten układ.

#### Literatura

- [1] KOLLEK W., KUDŹMA Z., STOSIAK M.: *Symulator liniowego napędu hydrostatycznego źródłem nowych możliwości badawczych*. Artykuł opublikowany na Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Napędy i Sterowania Hydrauliczne i Pneumatyczne”, Wrocław 2005.
- [2] KOLLEK W.: *Podstawy projektowania napędów i sterowań hydraulicznych*. Wrocław 2004.
- [3] SZYDELSKI Z.: *Napęd i sterowanie hydrauliczne*. Warszawa 1999.
- [4] PARSZEWSKI Z., ROSZKOWSKI M.: *Podstawy automatyki dla mechaników*. Warszawa 1976.
- [5] Dokumentacja symulatora napędu liniowego Hydropax Zy25 wraz z dokumentacją układu sterowania.

Wacław Kollek, Tomasz Siwulski, Michał Stosiak – Zakład Napędów i Hydrauliki Pneumatycznej, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska

artykuł recenzowany

reklama