

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Stanowisko badawcze napędów elektrohydraulicznych

ŁUKASZ ZAWARCZYŃSKI, TADEUSZ STEFAŃSKI

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
KATEDRA SYSTEMÓW STEROWANIA I ZARZĄDZANIA

Słowa kluczowe: silniki elektryczne, napęd elektryczny, napęd hydrauliczny, regulacja prędkości obrotowej

STRESZCZENIE

Przedstawiono stanowisko laboratoryjne do badań napędów elektrycznych i hydraulicznych. Do napędu pomp o stałej objętości geometrycznej zastosowano podstawowe rodzaje silników, tj. indukcyjny oraz ze wzbudzeniem od magnesów trwałych (synchroniczny i bezszczotkowy prądu stałego), które zasilano z falownika napięcia. Stanowisko wyposażono w typowe hydrauliczne zawory proporcjonalne, w tym: regulacyjny, dławiący, przelewowy oraz rozdzielacz, które umożliwiają uzyskanie różnej konfiguracji funkcjonalnej stanowiska. Do pomiaru wielkości elektrycznych, mechanicznych i hydraulicznych zastosowano specjalizowane, mikroprocesorowe układy pomiarowe. Zaprezentowano możliwości badawcze stanowiska oraz wybrane wyniki badań eksperymentalnych.

The laboratory research stand of electrohydraulic drives

Keywords: electric motors, electric drive system, hydraulic drive system, angular velocity control system

ABSTRACT

The laboratory research stand of electric and hydraulic drives was presented. The basic constructions of inverter-fed drives, asynchronous (80 Hz) and synchronous with the excitation from permanent magnet BLDC and PMSM with power equal to 2,5 kW were used. Electric drives were applied to drive hydraulic pumps (gear and piston). The hydraulic part is controlled by proportional valves: flow control, directional control and direct operated control valve. Specialised measuring system to control and diagnose electric drives, pumps, and another hydraulic elements was applied. The research capabilities of the stand and the example results of experimental tests for the chosen control methods were presented.

1. WPROWADZENIE

W układach hydraulicznych jako źródło napędu wykorzystuje się najczęściej klasyczny silnik indukcyjny (AC) zasilany z sieci, który napędza pompę o stałej objętości geometrycznej. W tego typu układzie napędowym nie ma możliwości zmiany prędkości obrotowej silnika elektrycznego, a sterowanie przepływem lub ciśnieniem jest możliwe jedynie poprzez zastosowanie odpowiednich elementów sterujących w części hydraulicznej. Zastosowanie napędu falownikowego umożliwia sterowanie wielkościami hydraulicznymi poprzez zmianę prędkości obrotowej lub momentu silnika elektrycznego. Wykorzystanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych silników, np. ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, a także przemienników energoelektronicznych, znacznie zwiększa parametry użytkowe napędów hydraulicznych [1].

Obecnie koszt napędu falownikowego z silnikiem z magnesami trwałymi jest zbliżony do kosztu napędu z silnikiem indukcyjnym. Układy napędowe z silnikiem synchronicznym PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*) lub BLDC (*Brushless DC Motor*) charakteryzują się dobrymi właściwościami regulacyjnymi, wysoką sprawnością i małymi gabarytami [1-3]. Nowoczesne konstrukcje falowników mają także możliwość zdalnego sterowania przy wykorzystaniu komunikacyjnych sieci przemysłowych (Profibus, MPI, Ethernet), paneli operatorskich z podglądem parametrów napędu oraz specjalizowanych układów kontrolno-sterujących [4].

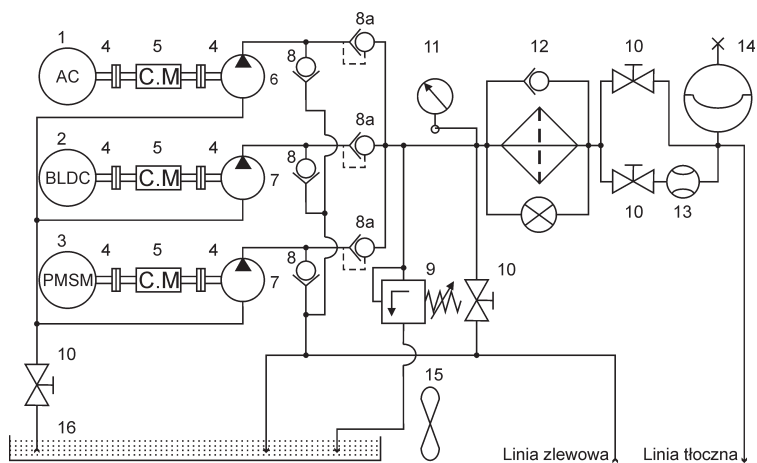
Sterowanie położeniem lub prędkością silnika czy też siłownika hydraulicznego jest możliwe poprzez dławienie przepływu (duże straty energii) lub zmianę wydajności pompy (zastosowanie pompy o zmiennej objętości geometrycznej przy stałej prędkości obrotowej lub pompy o stałej objętości geometrycznej przy zmiennej jej prędkości obrotowej). Sterowanie objętościowe, w odróżnieniu od sterowania dławieniowego, charakteryzuje się znacznie niższymi kosztami eksploatacyjnymi napędu hydraulicznego.

Do badań wyrobów przemysłowych, układów i metod sterowania, a także realizacji procesu kształcenia są stosowane specjalistyczne stanowiska badawcze [5, 6]. Przedstawione stanowisko napędów elektrohydraulicznych zostało zaprojektowane do badań napędów elektrycznych i hy-

draulicznych, może także być wykorzystane w procesie dydaktycznym. Przedstawiono opis konstrukcji, dane techniczne podstawowych elementów, możliwości badawcze oraz wybrane wyniki badań eksperymentalnych.

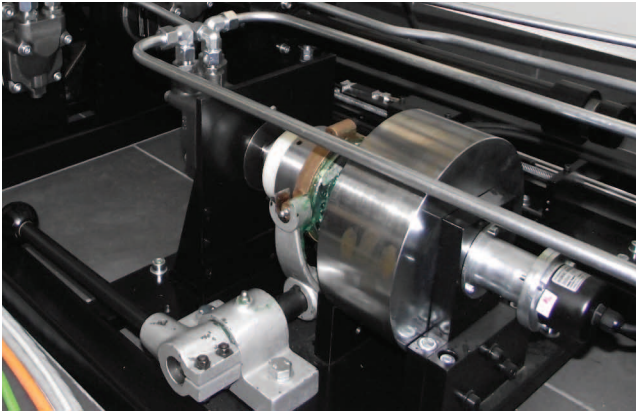
2. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

W prezentowanym stanowisku badawczym wyróżniono następujące zespoły: zasilający, wykonawczy i pomiarowo-sterujący. Schemat ideowy zespołu zasilającego przedstawiono na Rysunku 1, natomiast jego widok – na Rysunku 2. Podstawowymi elementami tego zespołu są zestawy falownikowych napędów pomp o stałej objętości geometrycznej, z silnikami elektrycznymi o małym momencie bezwładności. Silnik AC 1 (2,6 kW, 2300 obr/min) napędza pompę zębatą 6 (6 cm³/obr), natomiast silniki BLDC 2 i PMSM 3 (2,5 kW, 3000 obr/min) napędzają pompy tłoczkowe 7 (4,9 cm³/obr) – poprzez sprzęgła bezluzowe 4 (Radex-N) i układy pomiaru momentu obrotowego 5 (Data-flex). Zawory zwrotne 8 zabezpieczają pompy przed skutkami zmiany kierunku obrotów silników elektrycznych, natomiast sterowane ciśnieniem zawory zwrotne 8a zapobiegają bezpośredniemu przepływowi cieczy roboczej z pompy do zbiornika. Dodatkowymi elementami tego układu są: zawór przelewowy 9, zespół filtrujący 12, akumulator 14, przepływomierz turbinkowy 13 z wyjściem napięciowym, kulowe zawory odcinające 10, manometr 11, zestaw zbiornika 16 z pomiarem poziomu i temperatury cieczy oraz chłodnicą 15, sterowaną czujnikiem temperatury. Silniki elektryczne są zasilane z falownika MDS5110 (Stoerber, 11 kW) lub końcówki mocy (Semikron, 10 kW).

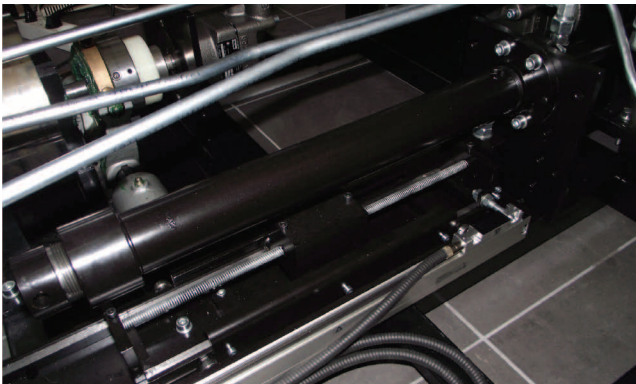


Rysunek 1 Schemat ideowy zespołu zasilającego

Figure 1 The schematic diagram of power supply unit

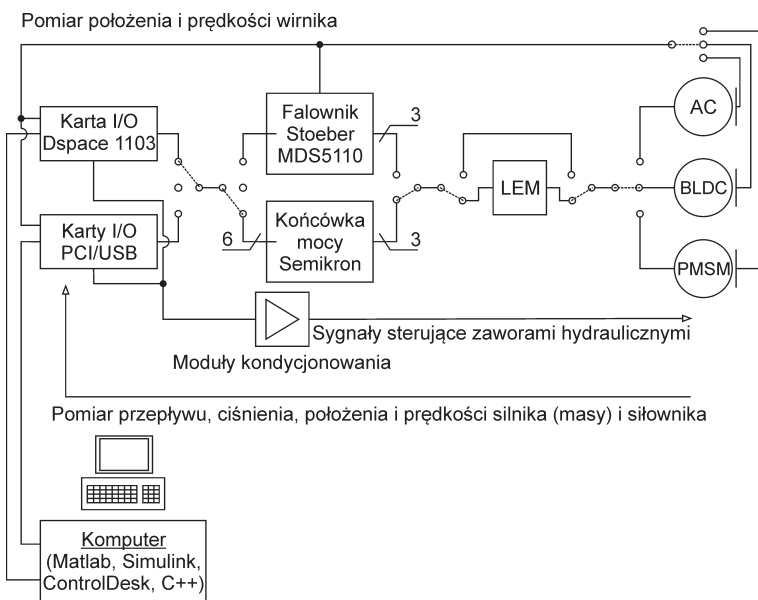


Rysunek 6 Widok układu silnika hydraulicznego
Figure 6 The view of hydraulic motor



Rysunek 7 Widok układu siłownika hydraulicznego z dodatkową masą
Figure 7 The view of hydraulic cylinder with additional load mass

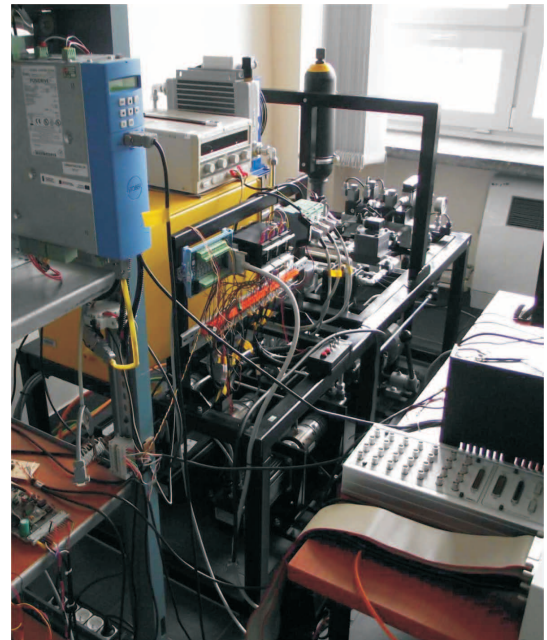
Zasadniczymi elementami zespołu pomiarowo-sterującego stanowiska (Rys. 8 i 9) są mikroprocesorowe układy pomiarowe wielkości elektrycznych (napięć i prądów fazowych stojana, momen-



Rysunek 8 Schemat blokowy zespołu pomiarowo-sterującego
Figure 8 The schematic diagram of measurement-control system unit

tu na wale silników), mechanicznych (prędkości i położenia kąowego silników elektrycznych oraz silnika hydraulicznego, prędkości i położenia liniowego tłoczyska siłownika, a także przyspieszenia i prędkości masy 29a) oraz hydraulicznych (ciśnienia, przepływu, temperatury cieczy roboczej).

Pomiar napięć i prądów fazowych jest dokonywany za pomocą przetworników hallotronowych typu LEM (prądowe LA55-P, 50 A; napięciowe LV25-P, 800 V), a wyznaczanie amplitud i składowych wektorów tych wielkości w różnych układach współrzędnych jest realizowane za pomocą układów mikroprocesorowych. Pomiar wielkości elektrycznych jest możliwy także bezpośrednio z falownika MDS5110, przy zastosowaniu dodatkowej karty typu REA5001 (Stoeber), z we/wy analogowymi i cyfrowymi.



Rysunek 9 Widok części pomiarowo-sterującej stanowiska
Figure 9 The view of measurement-control system unit

Pomiar prędkości i położenia wirnika silnika BLDC jest dokonywany na podstawie sygnałów impulsowych z enkodera (optyczny przetwornik obrotowo-impulsowy) i czujników Halla, a silników AC i PMSM – na podstawie sygnałów z resolverów (transformatorów położenia kąowego). Sygnaly z resolverów są przetwarzane przez przetworniki specjalizowane typu AD2S (Analog Devices), natomiast z enkoderów – przez przetworniki napięcie-częstotliwość typu VFC (Burr-Brown) i karty pomiarowe USB z wejściami ana-

logowymi i licznikami impulsów (Advantech). Do pomiaru położenia i prędkości silnika oraz siłownika hydraulicznego zastosowano enkodery. Pomiar przemieszczenia i prędkości liniowej siłownika jest dokonywany przez układ mikroprocesorowy na podstawie sygnałów impulsowych z przetwornika 28 (Precizika Metrology, L18-F50, 5 μm), a pomiar położenia i prędkości masy (silnika hydraulicznego) – na podstawie sygnałów z przetwornika obrotowo-impulsowego 26 (Wobit, 5000 imp./obr). Z kolei pomiar przyspieszenia i prędkości masy 29a jest dokonywany odpowiednio za pomocą czujnika przyspieszenia (Analog Devices, ADXL325) i transformatorowego czujnika położenia (Peltron, PJX200, 360 mm).

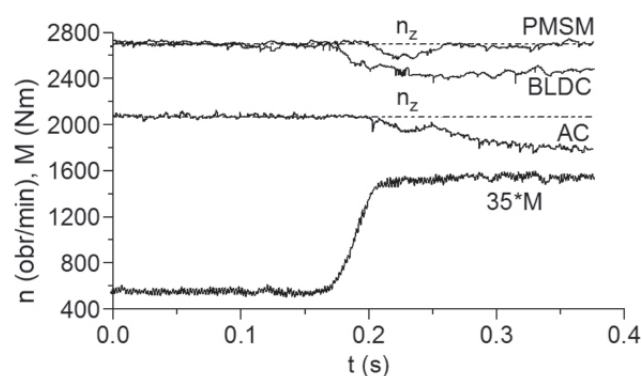
Wartość mocy czynnej pobieranej przez silniki jest wyznaczana pośrednio, jako iloczyn amplitud napięcia wyprostowanego i prądu falownika [7]. Możliwe jest również wyznaczenie mocy na wale silników (iloczyn momentu i prędkości kątowej) oraz mocy hydraulicznej (iloczyn natężenia przepływu i ciśnienia czynnika roboczego), a także mocy strat w poszczególnych układach. Sterowanie oraz akwizycja danych są realizowane za pomocą karty DSpace 1103, kart pomiarowych USB 4716 (Advantech) i komputera.

W napędzie elektrohydraulicznym zastosowano przetworniki i układy pomiarowe renomowanych firm. Klasa dokładności większości przetworników pomiarowych prądów, napięć, momentu, ciśnienia i przepływu wynosi 0,5. Do pomiaru sygnałów analogowych zastosowano przetworniki analogowo-cyfrowe o rozdzielczości 12 i 16 bitów, odpowiednio z kompensacją wagową typu SAR (karty Advantech) oraz z bezpośrednim, równoległym pomiarem typu FLASH (karta DSpace). Sygnały z przetworników pomiarowych można rejestrować z częstotliwością próbkowania do 500 kHz.

3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

Konstrukcja i oprzyrządowanie pomiarowe części hydraulicznej dają możliwość uzyskania dowolnej charakterystyki obciążenia momentem badanego silnika elektrycznego lub hydraulicznego, a także niezależnego badania układów regulacji prędkości, położenia lub momentu (siły) napędu hydraulicznego i napędu elektrycznego, przy zastosowaniu różnych metod sterowania. W analizowanym układzie napędowym regulacja przepływu, ciśnienia lub prędkości silnika (siłownika) hydraulicznego może odbywać się poprzez sterowanie prędkością i momentem silników elektrycznych (sterowanie objętościowe) lub poprzez zastosowanie szybkiego proporcjonalnego zaworu regulacyjnego (sterowanie dławieniowe).

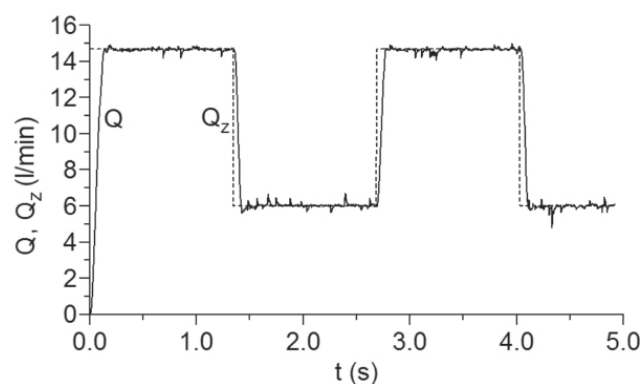
Na Rysunku 10 przedstawiono przebiegi czasowe regulacji prędkości obrotowych n silników elektrycznych przy skokowym zablokowaniu swobodnego przepływu (skokowa zmiana momentu obciążenia M i mocy z wartości ok. 0,8 do wartości 4,18 kW). Zadana wartość prędkości n_z dla silnika AC wynosiła 2070 obr/min, natomiast dla pozostałych silników 2700 obr/min. Badania rozruchu silników przy obciążeniu oraz regulacja prędkości dla skokowej zmian obciążeń wykazały, że najlepsze właściwości dynamiczne wykazuje silnik PMSM [1].



Rysunek 10 Przebiegi czasowe regulacji prędkości obrotowej silników elektrycznych przy skokowej zmianie obciążenia

Figure 10 The time responses of the velocity control of electric motors for the step change of the load

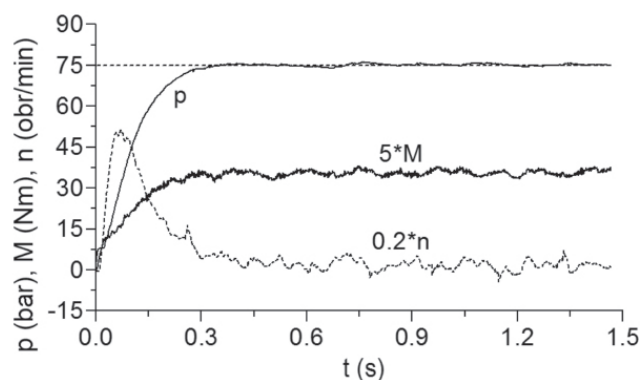
Rysunek 11 pokazuje przykład objętościowej regulacji zadanego Q_z i zarejestrowanego Q przepływu dla układu napędowego z silnikiem AC. Sterowanie objętościowe charakteryzuje się dobrą dynamiką, opóźnienie natężenia przepływu w stosunku do zadanego przebiegu jest nieznaczne [3].



Rysunek 11 Regulacja przepływu

Figure 11 The flow control

Również sterowanie ciśnieniem p (siłą lub momentem elementu wykonawczego) układu hydraulicznego można zrealizować przez zastosowanie sterowania objętościowego (odpowiednie sterowanie momentem M silnika elektrycznego) lub dławieniowego. Zastosowanie wektorowych metod sterowania momentem FOC (*Field-Oriented Control*) lub DTC (*Direct Torque Control*) umożliwia uzyskanie dynamiki regulacji ciśnienia, zbliżonej do sterowania dławieniowego [8]. Na Rysunku 12 zamieszczono przykład regulacji ciśnienia p dla sterowania objętościowego, przy zablokowanym przepływie. W układzie regulacji zadano wartość ciśnienia $p_z=75$ barów.



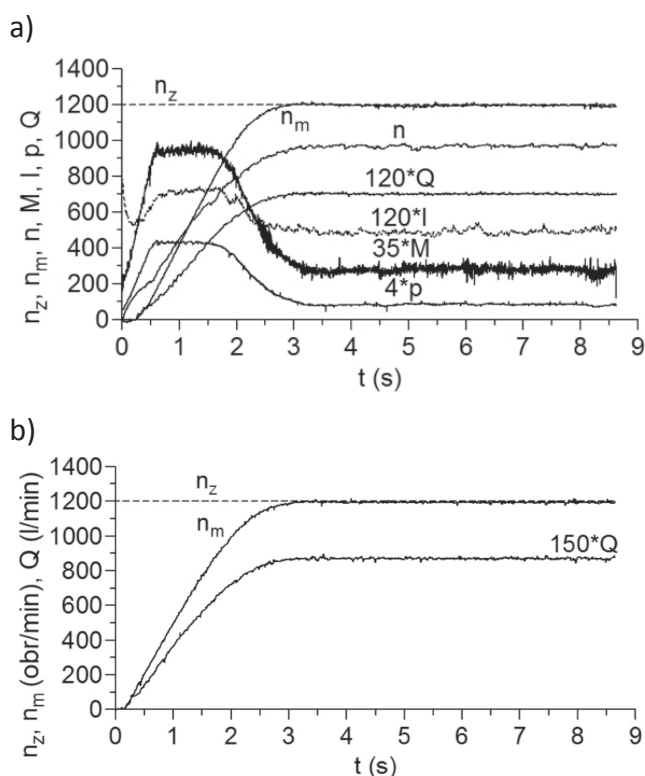
Rysunek 12 Regulacja ciśnienia przy zablokowanym przepływie (sterowanie objętościowe)

Figure 12 The pressure control with blocked flow (volumetric control)

Z kolei na Rysunku 13 zamieszczono przykłady regulacji prędkości obrotowej masy 25, stosując sterowanie objętościowe (z silnikiem PMSM) i sterowanie dławieniowe [1, 9].

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione stanowisko badawcze umożliwia wykonywanie badań naukowych z zakresu analizy: dynamiki układów sterowania napędami elektrycznymi z nowymi konstrukcjami silników, dynamiki i metod sterowania napędami hydraulicznymi i elektrohydraulicznymi, algorytmów tłumienia drgań mechanicznych, zdalnego sterowania parametrami układów napędowych poprzez wykorzystanie sieci przemysłowych itd. Zastosowanie przekształtnikowych napędów elektrycznych z mikroprocesorowymi układami kontrolno-pomiarowymi stwarza warunki do szerokiego zakresu badań napędów elektrycznych i elektrohydraulicznych, z kolei wykorzystanie sterowanego obciążenia hydraulicznego – do badań napędów elektrycznych. Zamieszczone przykładowe, a tak-



Rysunek 13 Regulacja prędkości masy: a) sterowanie objętościowe, b) sterowanie dławieniowe (Q [l/min]); I – amplituda wektora prądu stojana [A]; n_m – prędkość obrotowa silnika hydraulicznego; n_z – zadana wartość prędkości [obr/min]; p [bar]; M [Nm]

Figure 13 The speed mass control: a) volumetric control, b) throttling control (Q [l/min]); I – amplitude of the stator current vector [A]; n_m – speed of hydraulic motor [rpm]; n_z – the set value of speed [rpm]; p [bar]; M [Nm]

że opublikowane wyniki badań dowodzą, że zastosowanie falownikowego napędu pompy o stałej objętości geometrycznej (sterowanie objętościowe) zapewnia dynamikę regulacji prędkości wału silnika hydraulicznego, przepływu i ciśnienia porównywalną z dynamiką sterowania dławieniowego, przy znacznie wyższej sprawności. Z kolei zastosowanie mikroprocesorowych układów pomiarowych wielkości elektrycznych, mechanicznych i hydraulicznych oraz systemu kontrolno-sterującego dSpace daje możliwość konfigurowania różnych struktur układów regulacji położenia, prędkości, momentu, prądu, przepływu, ciśnienia itd.

Stanowisko wykonano ze środków finansowych projektu Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, POIG 02.02.00-26-023/08-00 „Rozwój Bazy Badawczej Specjalistycznych Laboratoriów Uczelni Publicznych Regionu Świętokrzyskiego”, przy współpracy z firmą PHS Sylwester Dmochowski, Wrocław.

LITERATURA

- [1] Stefański T., Zawarczyński Ł.: Analiza falownikowego napędu pompy hydraulicznej w układzie sterowania objętościowego. X Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2011.
- [2] Kaczmarek T., Zawirski K.: Układy napędowe z silnikiem synchronicznym. WPP, 2000, Poznań.
- [3] Stefański T., Zawarczyński Ł.: Sterowanie natężeniem przepływu w układzie hydraulicznym z falownikowym napędem pompy zębatej. *Hydraulika i Pneumatyka*, nr 1, 2012, str. 5-10.
- [4] Ataman M.: Komunikacja sieciowa w napędach serii 5000 firmy STOBBER. *Napędy i Sterowanie*, nr 3, 2007, str. 58-60.
- [5] Pluta J., Stojek J.: Stanowisko diagnostyczne pomp tłokowych osiowych. *Hydraulika i Pneumatyka*, nr 2, 2011, str. 5-9.
- [6] Dymarski Cz., Piątek D.: Stanowisko dydaktyczne do wyznaczania charakterystyk elementów hydraulicznych. *Hydraulika i Pneumatyka*, nr 1, 2012, str. 15-19.
- [7] Zawarczyński Ł., Stefański T.: Problemy pomiarowe w napędach falownikowych. *Logistyka*, nr 6, 2011, str. 4107-4117.
- [8] Stefański T., Zawarczyński Ł.: Analiza układu sterowania ciśnieniem w napędzie elektrohydraulicznym. Materiały Konferencyjne PNEUMA'2012.
- [9] Stefański T., Zawarczyński Ł.: Układ objętościowego sterowania prędkością obrotową silnika hydraulicznego. *Hydraulika i Pneumatyka*, nr 5, 2012, str. 12-19.