

Jakub WIERCIAK¹, Ksawery SZYKIEDANS¹, Jan RAWSKI¹, Jarosław LISICKI²

¹POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT MIKROMECHANIKI I FOTONIKI, UL. ŚW. A. BOBOLI 8, 02-525 WARSZAWA

²FOXITE, UL. SIENKIEWICZA 54, 05-319 CEGŁÓW

System pomiarowy do wyznaczania charakterystyk elektrycznych siłowników liniowych

Dr inż. Jakub WIERCIAK

Adiunkt w Zakładzie Konstrukcji Urządzeń Precyzyjnych Politechniki Warszawskiej. Od wielu lat zajmuje się problematyką konstruowania i badania elektrycznych układów napędowych urządzeń precyzyjnych.

W ostatnim czasie swoje zainteresowania naukowe koncentruje na zagadnieniach modelowania systemów mechatronicznych. Jest autorem i współautorem ponad 70. artykułów i referatów w wydawnictwach krajowych i zagranicznych.

e-mail: j.wierciak@mchtr.pw.edu.pl



Dr inż. Ksawery SZYKIEDANS

Adiunkt w Zakładzie Konstrukcji Urządzeń Precyzyjnych Politechniki Warszawskiej. Swoją naukową karierę wiąże z układami napędowymi urządzeń mechatronicznych. Prowadzi zajęcia dydaktyczne z zakresu konstrukcji urządzeń precyzyjnych i współczesnych narzędzi wspomagających projektowanie. W swoim dorobku ma 20 artykułów i referatów konferencyjnych. Jest konsultantem merytorycznym wydawnictwa DeAgostini Polska.

e-mail: k.szykiedans@mchtr.pw.edu.pl



Mgr inż. Jan RAWSKI

Specjalista w Zakładzie Konstrukcji Urządzeń Precyzyjnych Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się projektowaniem, wykonywaniem i uruchamianiem układów elektronicznych pomiarowych i sterujących wykorzystywanych w urządzeniach mechatronicznych. Jest współtwórcą wielu unikatowych stanowisk badawczych na potrzeby dydaktyki i prac naukowych. W swoim dorobku ma współautorstwo artykułów, referatów konferencyjnych i patentów.

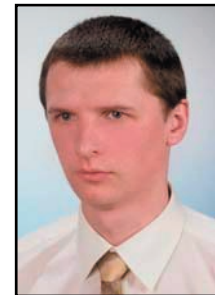
e-mail: j.rawski@mchtr.pw.edu.pl



Mgr inż. Jarosław LISICKI

Absolwent specjalności „Mikromechanika” na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Od kilku lat zajmuje się problemami związanymi z systemami wymiany informacji. Obecnie prowadzi firmę, która opracowuje zaawansowane rozwiązania na potrzeby internetowych serwisów użytkowników biznesowych.

e-mail: jaroslaw.lisicki@gmail.com



Streszczenie

Elektryczne siłowniki liniowe napędzane silnikami skokowymi są chętnie stosowane w precyzyjnych układach pozycjonujących. O ich przydatności do takich zastosowań przesądza nie tylko dokładność realizacji przemieszczeń, lecz także graniczne charakterystyki mechaniczne: rozruchowa i pracy. W artykule opisano zautomatyzowane stanowisko do badania elektrycznych siłowników liniowych opracowane i wykonane w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej. Przedstawiono rozwiązania torów sterujących i pomiarowych. Dołączono przykładowe charakterystyki siłowników wyznaczone z użyciem stanowiska.

Słowa kluczowe: silniki skokowe, charakterystyki graniczne, siłowniki liniowe

Measuring system for determining performance characteristics of electrical linear actuators

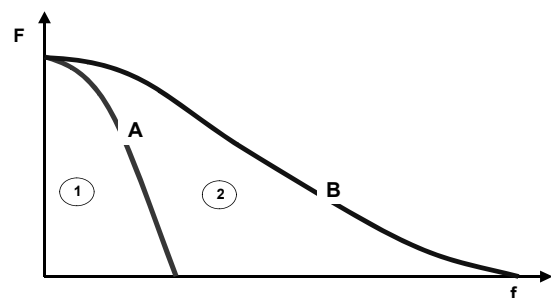
Abstract

Electrical linear actuators powered by stepping motors are commonly used for precision positioning. In some appliances not only resolution and accuracy of movement decide about their usefulness. Sometimes mechanical characteristics play an important role. These are pull-in and pull-out characteristics, which limit working areas of actuators in coordinates of developed force versus linear speed. In the paper there is a special measuring system for determining performance characteristics of actuators presented. It was designed and made in the Institute of Micromechanics and Photonics of Warsaw University of Technology. Technical solutions adopted for measuring and control channels are described. Exemplary characteristics of actuators are added.

Keywords: stepping motors, pull-in characteristic, pull-out characteristic, linear actuators

1. Wprowadzenie

Siłowniki liniowe napędzane elektrycznymi silnikami skokowymi są chętnie wykorzystywane do precyzyjnego pozycjonowania obiektów. Do zamiany ruchu obrotowego na liniowy wykorzystuje się w nich najczęściej mechanizmy śrubowe. Siłowniki takie znajdują zastosowanie m.in. w urządzeniach technologicznych i sprzęcie laboratoryjnym. O zastosowaniu siłownika decydują nie tylko jego rozdzielczość i dokładność pozycjonowania, lecz także charakterystyki mechaniczne wpływające na szybkość realizacji funkcji [1]. Charakterystyki te ograniczają dwa obszary działania siłowników: rozruchowy i pracy przyspieszonej (rys. 1). Wyznaczanie charakterystyk granicznych wymaga zasilania siłownika impulsami sterującymi o znanej częstotliwości, obciążania popychacza siłą o znanej wartości, a także precyzyjnej detekcji synchronizmu ruchu popychacza.

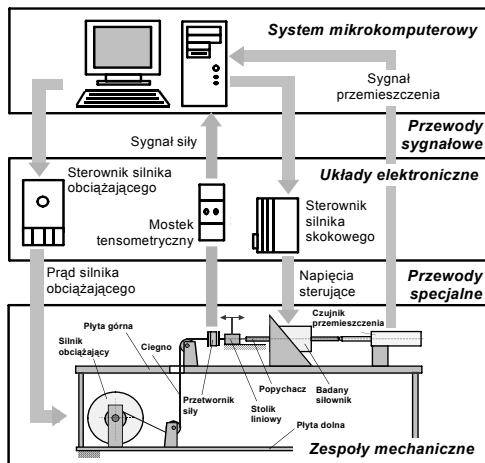


Rys. 1. Obszary pracy siłownika skokowego: 1 – praca rozruchowa, 2 – praca przyspieszona; graniczne charakterystyki: A – rozruchu, B – pracy; f – częstotliwość taktowania, F – rozwijana siła

Fig. 1. Working areas of stepping actuator: 1 – pull in, 2 – pull-out; A – pull-in characteristic B – pull-out characteristic; f – timing frequency, F – developed force

2. Struktura stanowiska

Stanowisko zaprojektowano i wykonano w oparciu o klasyczną strukturę [2] obejmującą zespoły: mechaniczny, elektroniczny i mikrokomputerowy (rys. 2) oraz zestawy przewodów.



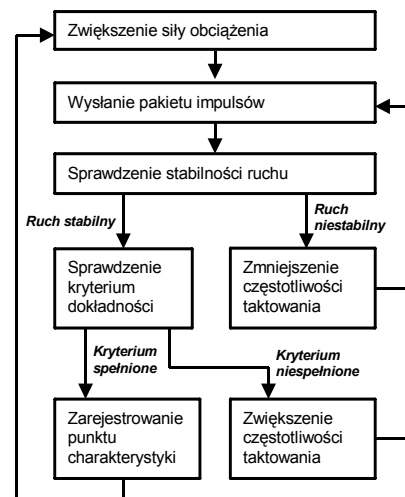
Rys. 2. Struktura stanowiska do badania siłowników liniowych
Fig. 2. Structure of the stand for testing linear actuators

W mikrokomputerze klasy *PC Pentium II* zainstalowano kartę sterująco-pomiarową *Advantech PCL 812 PG*. Karta przetwarza do 16 sygnałów analogowych z użyciem 12-bitowego przetwornika A/C przy maksymalnej częstotliwości wynoszącej 40 kHz. Do opracowania oprogramowania użyto języka *DELPHI 7*. Oprogramowanie stanowiska umożliwia automatyczne rejestrowanie mechanicznych charakterystyk siłowników i ich charakterystyk pozycjonowania. Interfejs użytkownika ma postać ekranu z polami do wprowadzania potrzebnych danych. Dane te obejmują oznaczenie badanego siłownika, dopuszczalną wartość siły obciążenia, prąd zasilania i sposób sterowania, a także wybór charakterystyk podlegających wyznaczeniu. Po zaakceptowaniu wprowadzonych danych przez użytkownika proces wyznaczania charakterystyk przebiega automatycznie.

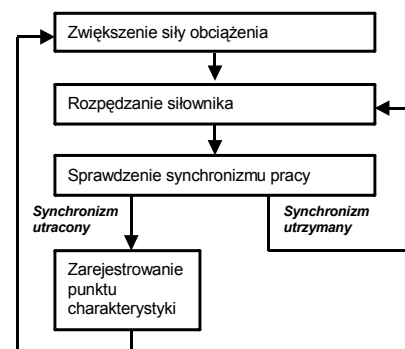
Graniczne charakterystyki rozruchowe wyznaczone są w następujący sposób: program obciąża siłownik określoną siłą z zakresu dopuszczalnych, a następnie poszukuje maksymalnej częstotliwości taktowania, przy której siłownik ruszy i będzie stabilnie pracował [1]. Miarą stabilnej pracy jest wykonanie przez popychacz siłownika przemieszczenia liniowego wynikającego z zadanej liczby impulsów taktujących. Po wyznaczeniu częstotliwości granicznej dla danego obciążenia program zwiększa siłę przyłożoną do popychacza i ponownie poszukuje maksymalnej częstotliwości taktowania. Cykl powtarzany jest aż do zadania siły, przy której siłownik nie jest zdolny do rozpoczęcia pracy. Na rys. 3 zamieszczono uproszczony algorytm pomiarowy tych charakterystyk.

Graniczna charakterystyka pracy siłownika wyznaczana jest jako zbiór punktów określających maksymalne częstotliwości synchronicznej pracy siłownika przy zadanych wartościach siły przyłożonej do popychacza. Algorytm polega naysterowaniu silnika obciążającego napięciem z modułu sterująco-pomiarowego, a następnie rozpędzaniu siłownika do chwili, gdy wypadnie on z synchronizmu [1]. Siły obciążenia zadawane są od wartości zerowej do takiej, przy której siłownik nie może już rozpocząć ruchu. Na rys. 4 przedstawiono w uproszczonej postaci algorytm wyznaczania granicznej charakterystyki pracy.

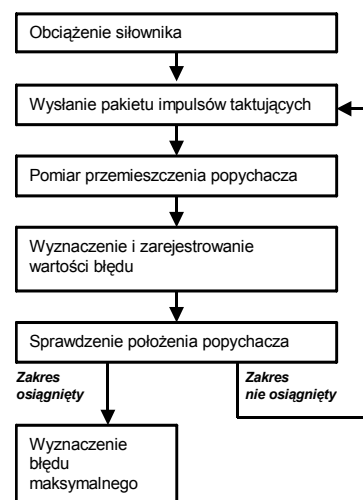
Jako podstawową charakterystykę pozycjonowania przyjęto maksymalny błąd położenia popychacza mierzony różnicą rzeczywistego i zadanego przemieszczenia w pełnym zakresie przemieszczeń. Uproszczony algorytm wyznaczania tego błędu przedstawiono na rys. 5.



Rys. 3. Algorytm wyznaczania charakterystyki rozruchowej
Fig. 3. Algorithm of determination of pull-in characteristic



Rys. 4. Algorytm wyznaczania granicznej charakterystyki pracy
Fig. 4. Algorithm of determination of pull-out characteristic

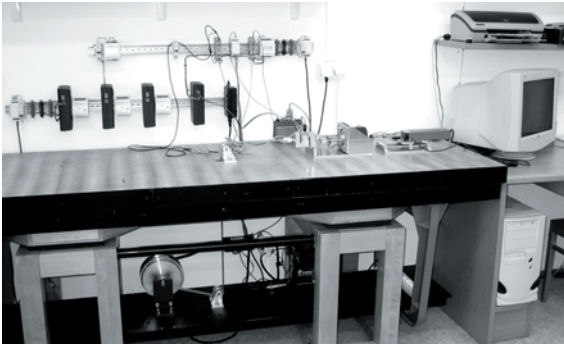


Rys. 5. Algorytm wyznaczania charakterystyk pozycjonowania
Fig. 5. Algorithm of determination of positioning characteristics

W stanowisku nie przewidziano zintegrowanego interfejsu sygnałowego. Pomocnicze urządzenia elektroniczne tworzą strukturę rozproszoną z możliwością łatwego zastępowania ich urządzeniami o parametrach lepiej dostosowanych do zmieniających się potrzeb.

Mechaniczne i elektromechaniczne zespoły stanowiska zmontowano wykorzystując jako podstawę specjalny stół z metalową płytą o sztywnej konstrukcji.

Na rys. 6 pokazano w widoku zbudowane stanowisko.



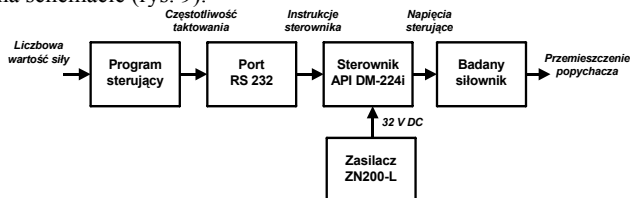
Rys. 6. Widok stanowiska badawczego
Fig. 6. General view of the stand

3. Tory sterujące i pomiarowe

Stanowisko jest wyposażone w dwa tory zadawania wymuszeń: tor sterowania i tor obciążania siłownika oraz dwa tory pomiarowe: siły obciążającej i przemieszczenia popychacza.

3.1. Układ sterowania siłownika

Układ sterowania siłownika obejmuje elementy przedstawione na schemacie (rys. 9).

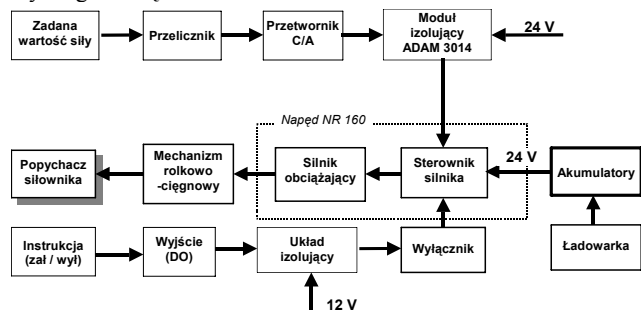


Rys. 7. Schemat blokowy toru sterowania siłownika
Fig. 7. Block diagram of an actuator control channel

Algorytmy sterujące są zapisane z użyciem języka *DELPHI 7*. Mikrokomputer połączony jest z zaawansowanym technicznie, mikroprocesorowym sterownikiem *API DM-224i* poprzez interfejs *RS 232* za pomocą specjalnego kabla. Przygotowane przewody łączą wyjście sterownika z wyprowadzeniami siłownika. Źródłem niezbędnej mocy elektrycznej jest zasilacz stabilizowany o napięciu 32 V i maksymalnym prądzie 8 A .

3.2. Układ obciążania siłą czynną

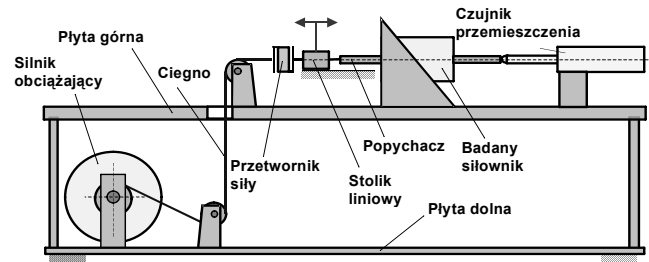
Na rys. 8 przedstawiono schemat blokowy toru zadawania czynnego obciążenia siłowników.



Rys. 8. Schemat blokowy toru obciążania siłownika siłą czynną
Fig. 8. Block diagram of loading force-applying channel

Badany siłownik jest obciążany za pomocą silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną sprzęgniętego z popychaczem mechanizmem rolkowo-cięgnowym (rys. 9). Sterownik silnika jest wzbudzany napięciem stałym z karty sterująco-pomiarowej *PCL 812 PG* za pośrednictwem specjalnego modułu izolującego *ADAM 3014* firmy *Advantech*. Optoizolacja zabezpiecza moduł sterująco-pomiarowy przed uszkodzeniem na skutek przepięć występujących w sterowniku. Źródłem mocy elektrycznej dostar-

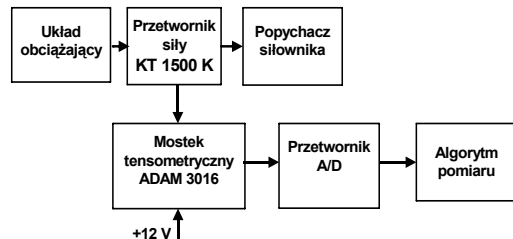
czanej do silnika są dwa akumulatory 12 V połączone szeregowo. Dodatkowy moduł sterowany z cyfrowego wyjścia karty komputerowej umożliwia zdalne włączanie i wyłączanie sterownika silnika. Układ służy do zadawania sił obciążających w zakresie do 2 kN .



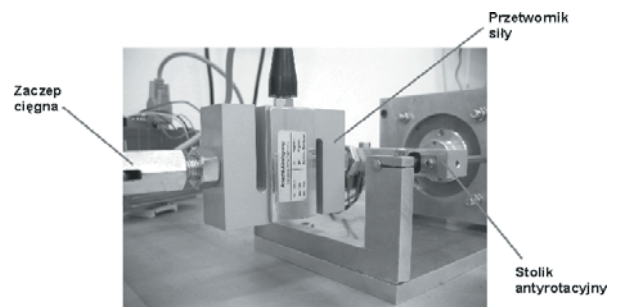
Rys. 9. Schemat układu obciążającego
Fig. 9. Diagram of loading system

3.3. Układ pomiaru siły

Schemat blokowy toru pomiaru siły przedstawiono na rys. 10. Tensometryczny przetwornik siły wmontowany pomiędzy popychacz i układ obciążający (rys. 11) współpracuje z modułem pomiarowym *ADAM 3016* firmy *ADVANTECH*. Analogowy sygnał siły jest podawany na wejście karty pomiarowej *PCL 812 PG*. Oprogramowanie przelicza sygnał na chwilową wartość siły obciążającej. Wzorcowanie toru pomiaru siły odbywa się przy zastosowaniu obciążników zakładanych na ciegno.



Rys. 10. Schemat blokowy toru pomiaru siły
Fig. 10. Block diagram of loading force-measuring channel



Rys. 11. Tensometryczny przetwornik siły w stanowisku badawczym
Fig. 11. Strain gauge transducer of loading force

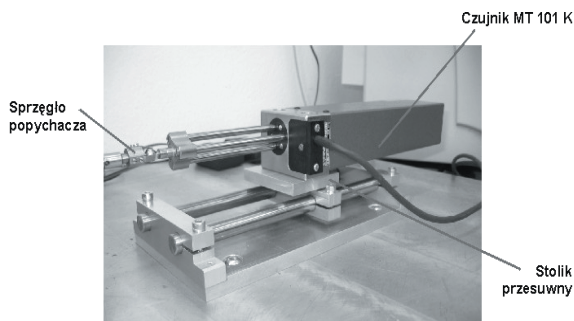
3.4. Układ pomiaru przemieszczeń popychacza

Układ pomiaru przemieszczeń popychacza zbudowano w oparciu o aparaturę renomowanej firmy *Heidenhain*. Schemat blokowy toru zamieszczono na rys. 12. Czujnik *MT-101K* (rys. 13) z wzorcem inkrementalnym o zakresie pomiarowym 100 mm i błędzie pomiaru mniejszym od $1\text{ }\mu\text{m}$ opiera się końcówką pomiarową o specjalnie ukształtowane zakończenie popychacza. Ciągły styk mechaniczny końcówki i popychacza zapewnia specjalne sprzęgło z elementem kulistym i płaskimi sprężynami ograniczające poprzeczne obciążenie końcówki czujnika. Dopasowanie osiowego położenia czujnika w stosunku do końcówki popycha-

cza umożliwia specjalnie zaprojektowany stolik na prowadnicach walcowych z zaciskami służącymi do ustalania i mocowania czujnika. Sinusoidalny sygnał z czujnika jest przekazywany do specjalnej karty licznikowej IK-220 umieszczonej w komputerze sterującym pracą stanowiska, która dokonuje elektronicznego dzielenia sygnału. Dołączone do aparatury moduły oprogramowania w języku DELPHI są wykorzystywane w algorytmach pomiarowych.



Rys. 12. Schemat blokowy toru pomiaru przemieszczeń
Fig. 12. Block diagram of pusher displacement measuring channel

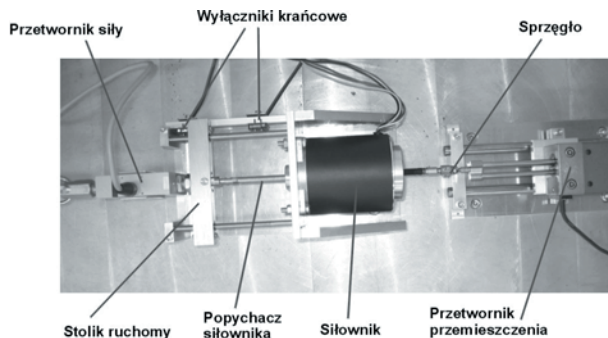


Rys. 13. Czujnik MT 101 K zamontowany w stanowisku badawczym
Fig. 13. MT-101 K gauge in the test stand

4. Badania

Przeprowadzono badania, które umożliwiły dokonanie niezbędnych modyfikacji stanowiska. Jako przykładowy obiekt badań wykorzystano siłownik LA34C2xN6x1,0 [3] zbudowany w spółce Mikroma S.A. na bazie hybrydowego silnika skokowego FA 34 [5]. Przy pomiarze granicznej charakterystyki rozruchowej sprawdzono metodę polegającą na obciążeniu siłownika siłą o określonej wartości, a następnie zadawaniu malejących częstotliwości taktowania, aż do sytuacji, w której siłownik ruszy i będzie stabilnie pracować [1, 2]. Metoda wykazała ograniczoną zdolność do wyznaczania charakterystyki w jej płaskich fragmentach. Dlatego do badania tych miejsc zaproponowano modyfikację polegającą na badaniu zdolności siłownika do rozruchu przy ustawianej częstotliwości taktowania i rosnącej sile obciążenia.

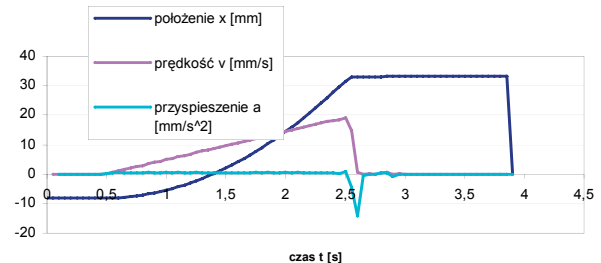
Całkowita automatyzacja pomiarów wymagała detekcji krańcowych położenia popychacza badanego siłownika. Dlatego stanowisko rozbudowano o układ z dwoma mikroprzełącznikami o ustawianych położeniach (rys. 14).



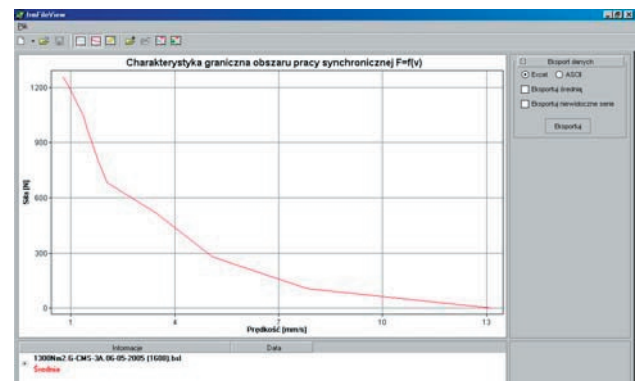
Rys. 14. Konfiguracja zespołów mechanicznych z dodanymi wyłącznikami krańcowymi
Fig. 14. View of mechanical assemblies with micro switches added

Przeprowadzono pomiary granicznej charakterystyki pracy siłownika. Stwierdzono, że prawidłowo funkcjonuje algorytm polegający na rozpadaniu obciążonego siłownika aż do wypadnięcia siłownika z synchronizmu [1, 2, 4]. Prace nad algorytmem koncentrowały się wokół problemu wykrywania utraty synchronizmu

oraz określaniu bieżącej wartości prędkości. Przyjęto, że do danego punktu charakterystyki pobierana będzie największa zmierzona wartość prędkości, przy której siłownik pracował prawidłowo. Na rys. 15 przedstawiono przebiegi wielkości związanych z ruchem popychacza podczas wyznaczania pojedynczego punktu charakterystyki, a na rys. 16 przykładową charakterystykę graniczną siłownika uzyskaną podczas badań.



Rys. 15. Przebiegi wielkości mechanicznych podczas wyznaczania pojedynczego punktu charakterystyki siłownika
Fig. 15. Time series of physical quantities related to a pusher movement during acquisition of a single point of actuator characteristic



Rys. 16. Graniczna charakterystyka pracy siłownika LA34C2xN6x1,0 uzyskana przy sterowaniu prądem 3 A
Fig. 16. Pull-out characteristic of LA34C2xN6x1,0 actuator determined in the test stand with 3 A current control

5. Podsumowanie

Opisane stanowisko wykazało zdolność do wyznaczania funkcjonalnych charakterystyk elektrycznych siłowników liniowych napędzanych silnikami skokowymi. Zbudowane tory sterujące i pomiarowe spełniają stawiane przed nimi wymagania. Za istotne osiągnięcie projektu autorzy uznają oryginalny układ obciążania siłowników, który okazał się skuteczny przy realizacji wymuszeń przewidzianych w algorytmach badawczych. Stanowisko zbudowano przy finansowym wsparciu Ministerstwa Nauki i Informatyzacji w ramach projektu celowego nr 6 T10 067 2001 C/5584.

6. Literatura

- [1]. *Konstrukcja przyrządów i urządzeń precyzyjnych*. Praca zbiorowa pod red. W. Oleksiuka. WNT. Warszawa 1996
- [2]. *Mikrosilniki elektryczne. Badanie właściwości statycznych i dynamicznych*. Praca zbiorowa pod redakcją W. Jaszczuka. PWN. Warszawa 1991
- [3]. Wierciak J., Oleksiuk W., Długiewicz L.: *Family of electric linear actuators using hybrid stepping motors*. International XIV symposium „Micromachines and Servodrives”, Tuczno, Poland, 12-16.09.2004, t., p. 97-104
- [4]. PN-92/M-42011. *Automatyka i pomiary przemysłowe. Siłowniki elektryczne. Ogólne wymagania i badania*
- [5]. MIKROMA Sp. z o. o. *Silniki skokowe*. Katalog