

**Witold JASZCZUK, Wiesław CZERWIEC**POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT MIKROMECHANIKI I FOTONIKI,  
ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa**Stanowisko do badań charakterystyk kątowych momentu statycznego silników skokowych**

Dr inż. Witold JASZCZUK

Ukończył studia na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej w 1970 r. W roku 1979 uzyskał stopień doktora. Jest autorem 4 skryptów, wielu preskryptów, redaktorem i współautorem monografii wydanej przez PWN na temat diagnostyki mikromaszyn elektrycznych oraz poradnika wydanego przez WNT, nagrodzonego I nagrodą na targach ATENA'97. Jest autorem 60 publikacji, 33 opatentowanych wynalazków, poradnika internetowego oraz konstruktorem wielu stanowisk badawczych, pomiarowych i dydaktycznych.



e-mail: w.jaszczuk@mech.pw.edu.pl

Dr inż. Wiesław CZERWIEC

Studia ukończył w 1967 r. na Wydz. Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej. Rozprawę doktorską z dziedziny drobnomodułowych kół zębatych obronił w 1978 r. Zainteresowania naukowe i techniczne: metodyka badań urządzeń mechatroniki, konstrukcja i badania zespołów funkcjonalnych urządzeń precyzyjnych, budowa zautomatyzowanych systemów pomiarowych do badań napędów, zespoły i układy optoelektroniczne do bezdotykowej diagnostyki urządzeń mechatroniki.

**Streszczenie**

W artykule podano definicję charakterystyki kątowej momentu statycznego silnika skokowego i zamieszczono klasyfikację stanowisk do badań charakterystyk kątowych. Opisano zbudowaną w Politechnice Warszawskiej automatyczną stację pomiarową do badania charakterystyk statycznych silników skokowych, skonstruowaną z wykorzystaniem wieloletnich doświadczeń autorów w dziedzinie badania właściwości mikromaszyn elektrycznych. Opisano schemat budowy stanowiska pomiarowego, podano konfigurację systemu pomiarowego. Scharakteryzowano program komputerowy do sterowania pomiarami i prowadzenia akwizycji wyników oraz ich graficznej wizualizacji. Na zakończenie zamieszczono przykładowe charakterystyki silników otrzymane opisanym urządzeniem i ich interpretację.

**Słowa kluczowe:** Silniki skokowe, badania, charakterystyki kątowe momentu statycznego, metody badań, stanowisko pomiarowe, budowa stanowiska, system pomiarowy, wyniki badań.

**Experimental studies of static torque/rotor position characteristics of stepper motors****Abstract**

In the introduction of the paper there is justified a need of using modern and effective test stands for studying stepper motors with regard to automation of their manufacturing processes and mass production of these motors. A definition of static torque/rotor position characteristics of a stepper motor as well as a definition of its static stability zone and angular deviation of the rotor position while loaded with an external torque are given. There is included a classification of test stands for studying angular characteristics of stepper motors (Fig. 1), and there is described an automatic measurement station for studying static characteristics of stepper motors, built at the Warsaw University of Technology, designed on the basis of a long-standing experience of the authors in the field of studying properties of electric micromachines. A schematic of a structure of the measurement station is shown (Fig. 2), and a configuration of the measuring system is presented (Fig. 3). In Tab. 1 the basic functional parameters describing the device are collected and its essential metrological features are given. In the further part of the paper there is characterized a computer program for controlling measurements and performing data acquisition related to results of the measurements as well as their graphical visualization. An algorithm of the program operation is also presented (Fig. 5). At the end there are presented exemplary static torque/rotor position characteristics of a hybrid motor supplied in a standard way (Fig. 6) and not supplied (no current flow) – Fig. 7, obtained by means of the described system. The summary describes shortly the content of the paper and provides interpretation of the obtained results of measurements. The references consist of an extensive list of publications related to the problem of studying characteristics of stepper motors, issued over a period of many years.

**Keywords:** Stepper motors, experimental studies, static torque/rotor position characteristics, methods of testing, test station, structure of the test station, measuring system, results of the studies.

**1. Wprowadzenie**

Można oszacować, że liczba silników skokowych użytkowanych na świecie znacznie przekracza 40 mld. sztuk. Większość z nich wyprodukowano w ostatnich 10 latach. W fabrykach wytwarzających te silniki procesy produkcyjne są od wielu lat zautomatyzowane.

Zgodnie z procedurami zapewnienia jakości część spośród tych maszyn podlega badaniom parametrów technicznych. Przy użyciu tradycyjnie stosowanych, prostych stanowisk pomiarowych, czas przebadania gotowego wyrobu byłby nieporównywalnie długi w stosunku do czasu jego wytworzenia [1, 6, 11, 13]. Niezbędna stała się automatyzacja stanowisk diagnostycznych, stymulująca poprawę jakości i opłacalności produkcji. Im większa jest wydajność linii produkcyjnych, tym szybciej powinny być wychwytywane niekorzystne tendencje i odchyłki od wzorca, aby dostatecznie wcześniej przerwać proces wytwarzania silników nie spełniających wymagań technicznych.

W przypadku silników do zastosowań szczególnie odpowiedzialnych, np. w sprzęcie medycznym, robotyce czy sprzęcie militarnym wymaga się dodatkowo wstępnej selekcji oraz stuprocentowej kontroli charakterystyk statycznych [9, 12, 20]: histogramu błędów skoku i charakterystyk kątowych momentu statycznego. Procedurę taką przyjmuje się w stosunku do silników skokowych o gwarantowanych i ściśle określonych właściwościach [7, 8]. Selekcja i atestacja podwyższają cenę, ale prognozują niezawodną pracę silników w budowanych urządzeniach.

Stosowanie silników skokowych w tanich układach napędowych i pozycjonujących również wymaga prowadzenia badań. Istnieje przy tym potrzeba wyznaczania zarówno właściwości statycznych jak i dynamicznych [4].

**2. Metody pomiarów charakterystyk kątowych momentu statycznego**

*Charakterystyka kątowa momentu statycznego* silnika skokowego, nazywana także *charakterystyką statyczną momentu synchronizującego*, jest ilustracją zależności momentu oddziaływania stojana na wirnik silnika, jakie powstaje na skutek wymuszanego obrotu wirnika przy nieruchomym wektorze strumienia stojana [6, 14, 15]. Charakterystyka powinna być wyznaczana w warunkach statycznych, to znaczy przy zatrzymanej komutacji i w stanie nagrzanym normalnym maszyny. Zgodnie z wymaganiami normy [22] charakterystyka powinna obejmować pełen zakres zmian wartości momentu i powinna być wyznaczana dla wszystkich możliwych stanów cyklu komutacji.

Charakterystyka ta nie może być uzyskana z dostateczną dokładnością na podstawie obliczeń analitycznych [15]. Jej przebieg zależy od wielu parametrów konstrukcyjnych, materiałowych, technologicznych, a także od stanu elektrycznego silnika, tzn. od

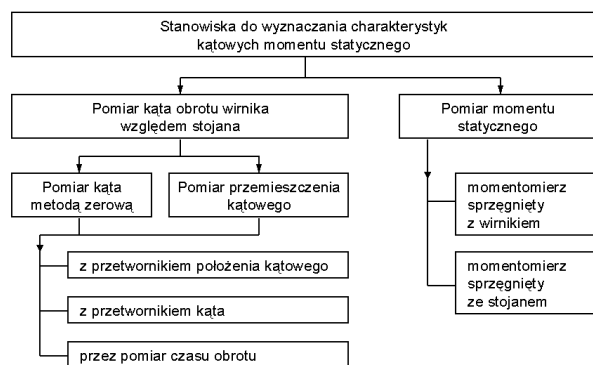
sposobu komutacji, czyli liczby jednocześnie wzbudzanych pasm, wartości prądów w pasmach, stopnia nasycenia magnetowodu, temperatury maszyny i wielu innych czynników.

W związku z tym najskuteczniejszą metodą pozyskania charakterystyk kątowych momentu statycznego pozostają badania eksperymentalne.

Znajomość charakterystyki kątowej momentu statycznego umożliwia oszacowanie błędów osiągania zadanych pozycji przy obciążeniu silnika momentem sił czynnych lub momentem tarcia.

Stanowisko badawcze do wyznaczania charakterystyk kątowych momentu statycznego musi umożliwiać równoczesne pomiary momentu synchronizującego oraz kąta obrotu wirnika względem stojana [12, 16, 17]. Momentomierz może być sprzęgnięty z wirnikiem lub ze stojanem, mierząc w tym przypadku reakcję w zamocowaniu stojana podczas wymuszonego obrotu wirnika [2, 3].

Polska norma [22] nie stawia poza tym innych istotnych wymagań. Nie zaleca też żadnej konkretnej metody pomiarów. Pomiary kąta obrotu wirnika lub stojana można zrealizować jedną z metod przedstawionych na rys. 3, zaczerpniętym z monografii [12]. Przedstawia on klasyfikację stanowisk do badań charakterystyk kątowych momentu statycznego.



Rys. 1. Klasyfikacja stanowisk do badań charakterystyk kątowych momentu statycznego

Fig. 1. Classification of test stations for studying static torque/rotor position characteristics

W stanowisku pomiarowym może być wykorzystana jedna z dwu koncepcji przeprowadzania pomiarów [16, 17]:

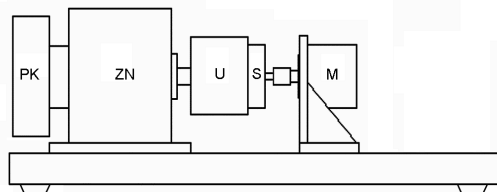
- z zadawaniem znanego momentu obciążenia i pomiarem kąta dewiacji spowodowanej tym momentem (wychylenia kątowego pod wpływem momentu);
- z wymuszaniem obrotu wirnika względem stojana i pomiarem wywołanego tym momentu.

W obu tych koncepcjach problemem wymagającym uwzględnienia jest niedoskonała sztywność momentomierza. Poza piezoelektrycznymi miernikami momentu wszystkie inne, a więc: optyczne i optoelektryczne, pojemnościowe, tensometryczne odporowe i półprzewodnikowe, magnetyczne, indukcyjne - należą do grupy przetworników z pomiarem przemieszczenia lub odkształcenia. Z istoty ich działania wynika pewne odkształcenie sprężyste miernika momentu [19]. W metodzie pierwszej - z zadawaniem znanego momentu obciążenia i pomiarem kąta dewiacji - droga kątowa zadawania momentu musi być powiększona o kąt skręcenia momentomierza. W metodzie drugiej - z wymuszaniem obrotu wirnika względem stojana i pomiarem wywołanego tym momentu synchronizującego - otrzymana z pomiaru wartość momentu powinna być powiększona algebraicznie o poprawkę wynikającą z charakterystyki ugięcia momentomierza, gdyż w istocie kąt skręcenia jest mniejszy niż zamierzony.

W nowoczesnych stacjach diagnostycznych do badania statycznych właściwości silników skokowych problem rozwiązywany jest przez umieszczenie w programie obliczeniowym wyników pomiarów danych dotyczących charakterystyki ugięć (skręceń) samego momentomierza [12].

### 3. System pomiarowy charakterystyk kątowych momentu

Podstawowym zespołem systemu pomiarowego charakterystyk kątowych momentu statycznego silników skokowych jest stanowisko badawcze, którego schemat pokazano na rys. 2. Schemat konfiguracji urządzeń stanowiska przedstawiono na rys. 3.

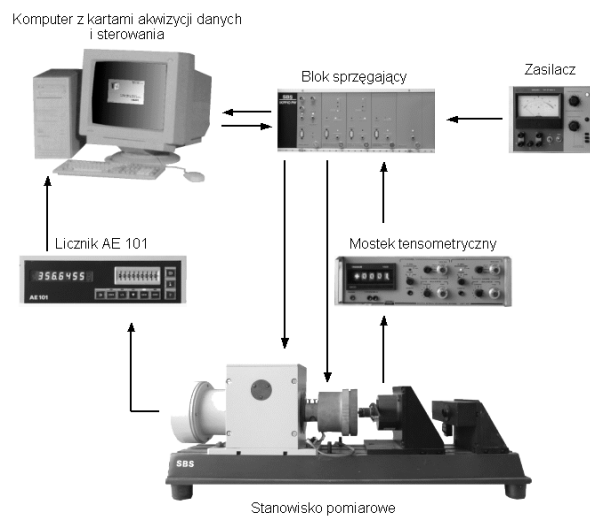


Rys. 2. Schemat budowy stanowiska pomiarowego: *S* - badany silnik skokowy, *U* - obrotowy uchwyt silnika, *ZN* - zespół napędu, *PK* - obrotowo impulsowy czujnik przemieszczenia kątowego, *M* - momentomierz

Fig. 2. Schematic diagram of the measuring station structure: *S* - the tested stepper motor, *U* - rotary holder of the motor, *ZN* - drive unit, *PK* - rotation-to-pulse sensor of angular displacement, *M* - torque meter

Badany silnik skokowy *S* (rys. 2) jest mocowany w uchwycie *U*, obracany przez zespół napędu *ZN* z pomocniczym silnikiem skokowym i dwustopniowym reduktorem o przełożeniu 1:280. Czujnik przemieszczenia kątowego *PK* połączony z uchwycem obrotowym *U* za pośrednictwem wałka napędu *ZN*.

Do pomiaru przemieszczenia kątowego użyto inkrementalny czujnik typu IDW-2 o dokładności 1'' prod. firmy C. ZEISS, który współpracuje ze zmodyfikowanym licznikiem typu AE 101 tej firmy [18, 21].



Rys. 3. Konfiguracja systemu do wyznaczenia charakterystyki kątowej momentu statycznego

Fig. 3. Configuration of the system for determining static torque/rotor position characteristic

Podczas wyznaczania charakterystyki momentu statycznego mierzony jest kąt obrotu stojana i odpowiadający mu moment synchronizujący. Pomiary realizuje się z użyciem utwierdzonego momentomierza wybranego z typoszeregu o symbolu *SPM*, którego wałek jest sprzęgnięty z wałkiem badanego silnika sprzęgłem mieszkowym sztywnym na skręcanie, ale podatnym poprzecznie i kątowo. Podczas pomiaru charakterystyki uchwyt obrotowy jest stale napędzany, a informacje o wartości momentu i bieżącym kącie obrotu zostają wprowadzane do komputera za pośrednictwem modułu pomiarowego i odpowiednich analogowo-cyfrowych kart akwizycji danych i sterowania. W urządzeniu zastosowano karty firmy ADVANTECH: PCL-818L oraz PCL-731. Momentomierze *SPM* o trzech różnych zakresach pomiarowych:  $(-0,1 \div 0,1, -0,25 \div 0,25$  oraz  $-0,5 \div 0,5)$  Nm i błędach

pomiaru mniejszych od 0,5% zakresu pomiarowego opracowano i wykonano w Politechnice Warszawskiej [12, 19]. W tablicy 1 zestawiono ważniejsze parametry systemu pomiarowego.

Tab. 1. Wybrane parametry systemu pomiarowego  
Tab. 1. Selected parameters of the measuring system

Opisywana cecha	Wartość liczbową i miano
Pomiar momentu statycznego w zakresach	$\pm 0,1 \text{ Nm}$ ; $\pm 0,25 \text{ Nm}$ ; $\pm 0,5 \text{ Nm}$
Uchyb pomiaru wartości momentu statycznego	$< 1\%$ ,
Pomiar kąta wychylenia (dewiacji) wirnika z uchybem	$< \pm 20^\circ$
Komutacja badanego silnika napięciowa lub prądowa, bipolarna lub unipolarna, dwu- lub czteropasmowa	-
Komputerowe sterowanie pomiarami, przetwarzaniem i wizualizacją wyników	-

#### 4. Program sterujący systemem pomiarowym

Do obsługi systemu pomiarowego opracowano specjalny program o nazwie SILNIK [10], który realizuje automatycznie pomiary charakterystyk kątowych momentu statycznego oraz przetwarza wyniki pomiarów. Główne okno programu napisanego z wykorzystaniem struktury MDI (Multi Document Interface), zostaje załadowane na początku działania aplikacji. Pozostałe okna są wyświetlane wewnątrz okna głównego. W zależności od tego, które okno wewnętrzne jest aktualnie widoczne, określone opcje menu są uaktywniane bądź dezaktywowane. Zapewnia to prostą obsługę zmniejszając możliwość wykonania błędnej operacji.

Przykładowe okna programu nałożone poglądowo na tle ekranu głównego pokazano na rys. 4.

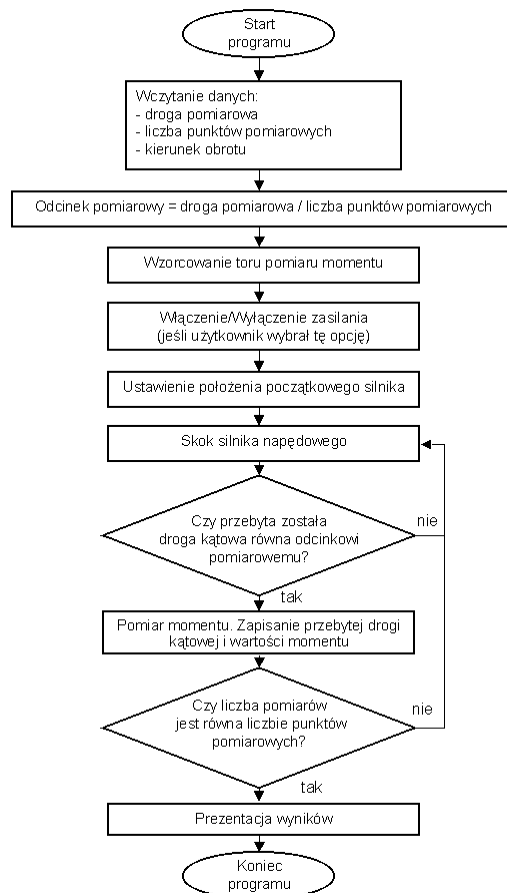


Rys. 4. Przykładowe, wybrane okna programu nałożone na obraz ekranu głównego  
Fig. 4. Exemplary selected windows of the program over the image of the main display

Wyniki pomiarów są w formacie danych MS Excel. Użytkownik ma możliwość zapisania ich w formie arkusza (\*.xls) lub jako pliku tekstowego (\*.txt). Gdy cykl pomiarowy skończy się, następuje wyświetlenie arkusza z wynikami i ich wizualizacja graficzna, wyzerowanie ustawień programu i przejście do okna początkowego w oczekiwaniu na następne pomiary. Algorytm działania tego programu przedstawiono na rysunku 5.

Przed wykonaniem pomiaru charakterystyki kątowej momentu program umożliwia wprowadzenie wartości drogi pomiarowej oraz liczby punktów pomiarowych. Pomiary są możliwe w jednym z trzech trybów: rejestracji wartości momentu od zera - gdy moment narasta, rejestracji wartości momentu od zera - gdy moment maleje oraz rejestracji wartości momentu w aktualnym położeniu kątowym silnika w chwili rozpoczęcia pomiaru. Dalej

następuje wzorcowanie toru pomiaru momentu i wykonanie nastaw wybranych przez użytkownika. Podczas pomiaru następuje obrót stojana badanego silnika do chwili, gdy zrealizowana zostanie zadana droga kątowa. Po wykonaniu liczby pomiarów równej liczbie punktów pomiarowych program przechodzi do prezentacji wyników.

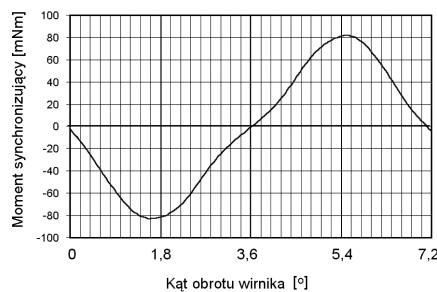


Rys. 5. Algorytm działania programu do wyznaczania charakterystyki kątowej momentu statycznego

Fig. 5. Operation algorithm of the program for determining static torque/rotor position characteristic

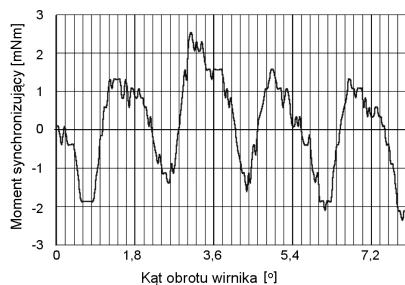
#### 5. Wyniki pomiarów charakterystyk kątowych momentu statycznego

Na kolejnych dwóch ilustracjach przedstawiono wyniki pomiarów charakterystyk kątowych momentu statycznego przykładowo wybranego silnika skokowego typu FA 1512 produkcji fabryki MIKROMA, zasilanego napięciowo unipolarnie oraz po wyłączeniu tego zasilania.



Rys. 6. Charakterystyka kątowa momentu statycznego silnika FA 1512 zasilanego dwupasmowo unipolarnie prądem 0,16 A

Fig. 6. Static torque/rotor position characteristic of the motor FA 1512 supplied with a current of 0.16 A by a two-phase, unipolar circuit



Rys. 7. Charakterystyka kątowa momentu statycznego silnika FA 1512 w stanie braku zasilania (bezpądowym)

Fig. 7. Static torque/rotor position characteristic of the motor FA 1512 with no supply (no current flow)

Silnik typu hybrydowego charakteryzuje się występowaniem momentu także w stanie bezpądowym, ze względu na obecność magnesu trwałego umieszczonego w wirniku. Wartości momentu w stanie bezpądowym są jednak wielokrotnie mniejsze niż w silniku wzbudzonym prądem, a okresowość zmian większa czterokrotnie. Wynika to z jakości magnesu i budowy maszyny.

## 6. Podsumowanie i wnioski z pomiarów

Artykuł miał celu przedstawienie automatycznej stacji pomiarowej do badania charakterystyk statycznych silników skokowych, zbudowanej z wykorzystaniem wieloletnich doświadczeń autorów w dziedzinie badania właściwości silników skokowych oraz pokazanie przykładowych wyników pomiarów otrzymanych przy pomocy tego urządzenia. Na wstępie publikacji przypomniano znane definicje charakterystyki kątowej momentu statycznego silnika skokowego, a także zamieszczono klasyfikację stanowisk do badań charakterystyk kątowych. Opisano także system pomiarowy charakterystyk kątowych i program komputerowy napisany do sterowania tym systemem. Na zakończenie zamieszczono przykładowe charakterystyki silników otrzymane prezentowanym urządzeniem.

Charakterystyka zamieszczona na rys. 6 nie wymaga dodatkowych objaśnień. Jej przebieg jest typowy dla silników hybrydowych. Podkreślenia wymaga jedynie wysoka dokładność pomiarów momentu z uchybem mniejszym od 1 % oraz bardzo wysoka dokładność pomiarów kąta z uchybem mniejszym od  $\pm 20''$ . Czas badania silnika nie przekraczał 30 sekund.

Tak dobre parametry metrologiczne opisywanego systemu pomiarowego umożliwiają także badania silników w stanie bezpądowym (rys. 7). Wykres momentu przy braku zasilania wyraźnie odwzorowuje zjawiska rzadko opisywane w literaturze – tarcia w ułożyskowaniu oraz faktu, że w silniku hybrydowym w stanie bezpądowym współpracują równocześnie wszystkie zęby wirnika i wszystkie zęby stojana. W wirnikach drobno uzębionych bywa ich kilkadziesiąt. Dlatego moment zmienia znak przy dużych rozrzutach wartości kąta, odbiegającego od nominalnego dla tego typu maszyny, wynoszącego teoretycznie  $0,9^\circ$  (połowę skoku  $1,8^\circ$ ). Powodem są niedokładności wykonania silnika, a szczególnie:

- podziałki kątowej zębów wirnika;
- podziałki kątowej drobno uzębionych nakładek na biegunach stojana;
- szerokości zębów wirnika i zębów stojana w strefie szczeliny roboczej maszyny;
- kąta przestawienia o pół podziałki kątowej obu reluktancyjnych pakietów wirnika (silnik jest typu hybrydowego);
- współosiowości osadzenia wirnika na wałku silnika;
- współosiowości osadzenia ułożyskowania wirnika względem stojana;
- jakości wykrojów blach wirnika i stojana;
- poprawności pakietowania blach wirnika i stojana tak, aby styczna do krawędzi zębów była równoległa do osi geometrycznej silnika.

Wymienione tu niedokładności powodują błędy kątowe położenia i głównie z tego powodu charakterystyka w stanie bezpądowym jest tak znacznie zniekształconą sinusoidą. Z charakterystyki tej wynika także, że w badanym silniku zastosowano magnes o małej indukcji i niedostatecznie namagnesowany. Zastąpienie magnesu typu Alnico magnesem neodymowym znacznie zwiększyło by amplitudę momentu w stanie bezpądowym, a także w silniku zasilanym prądem.

## 7. Literatura

- [1] Buschmann H., Hickmann W.: Universelles Messsystem zur Untersuchung von Kleinmotoren. *Feinwerktechnik & Messtechnik*. Nr 8/1980, Vol. 88, s. 425-428.
- [2] Czerwiec W.: Stanowisko pomiarowe do badań statycznych właściwości silników skoko-wych. VIII Sympozjum Mikromaszyny i Serwonapędy. Książ, 14 – 18. 09.1992, t. II, s. 84-94.
- [3] Jaszczuk W., Czerwiec W., Deczkowski B.: Metody pomiaru statycznego momentu syn-chronizującego wirnik, stosowane w diagnostyce silników skokowych. VI Sympozjum Metrologia '89. Warszawa 1989, s. 407-414.
- [4] Jaszczuk W., Czerwiec W.: Neue Messmethoden und Prüfstände für komplexe Untersuchungen von Schrittmotoren. 34. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium TH Ilmenau. Posterbeiträge B.2.2., Ilmenau 1989; s. 6.
- [5] Jaszczuk W., Szymański M.: Silniki skokowe. Cz. I – właściwości, zastosowania i komuta-cja uzwojeń. Napędy i Sterowanie. Nr 4/2004, s. 49-52.
- [6] Jaszczuk W., Wierciak J., Bodnicki M.: Napędy elektromechaniczne urządzeń precyzyj-nych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2007.
- [7] Jaszczuk W.: Steigerung der Effektivität bei experimentellen Forschungen der elektrome-chanischen Antriebe. 28. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der Technischen Hochschule Ilmenau. 1983, s. 29-34.
- [8] Jaszczuk W.: Metody i urządzenia do wyznaczania charakterystyk silników skokowych. *Metrologia i Systemy Pomiarowe*. Zeszyt 7/1990; s. 113-125.
- [9] Kessler K. H.: Mess- und Prüftechnik in der Kleinmotoren-Fertigung. *Feinwerktechnik & Messtechnik*. Nr 3/1977, s. 116-121.
- [10] Młodkowski M.: Opracowanie programu sterującego pracą stanowiska do badań silników skokowych. Praca dyplomowa pod kier. W. Czerwca, PW, Warszawa 2006.
- [11] Owczarek J.: Elektryczne maszynowe elementy automatyki. Praca zbiorowa. Warszawa, WNT, 1983.
- [12] Praca zbiorowa pod red. W. Jaszczuka: Mikrosilniki elektryczne. Badanie własności sta-tycznych i dynamicznych.. PWN, Warszawa 1991.
- [13] Rödel G., Gollhardt E.: Messungen von Schrittmotor-Kennwerten. *Feingerätetechnik*. Berlin, Nr 7/1988, s. 314-316.
- [14] Sochocki R.: Mikromaszyny elektryczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1996.
- [15] Wróbel T.: Silniki skokowe. WNT Warszawa 1993.
- [16] Czerwiec W., Deczkowski B.: Sposób i układ do pomiaru charakterystyki kątowej statycznego momentu silnika skokowego. Patent RP nr.156904, 1992 r.
- [17] Czerwiec W., Deczkowski B.: Sposób i układ do wyznaczania charakterystyki statycznego momentu silnika skokowego. Patent RP nr.156905, 1992 r.
- [18] Czerwiec W., Deczkowski B.: Układ do pomiaru wartości kąta skoku wirnika silnika skokowego. Patent nr 156903, 1992 r.
- [19] Politechnika Warszawska IKPPIO: Stacjonarne przetworniki momentu typu SPM. Karta katalogowa, 1989.
- [20] PORTESCAP: Escap Motion Systems. Katalog 1989.
- [21] C. ZEISS: IDW Inkrementales Durchlichtwinkelmesssystem, 1985.
- [22] Polska Norma PN-E-06836 (1996 r.): Maszyny elektryczne wirujące. Maszyny do sterowania. Silniki skokowe.