

STANISŁAW GÓRECKI

Katedra Technologii i Metrologii Elektrycznej

PERSPEKTYWY ZASTOSOWANIA SILNIKÓW KROKOWYCH
W NAPĘDZIE ZAUTOMATYZOWANYM

Streszczenie. Przedmiotem artykułu są zagadnienia wstępne dotyczące zastosowania silników krokowych w nowoczesnym napędzie zautomatyzowanym. Omówiono specyfikę pracy silników krokowych związaną z szerokim zakresem częstotliwościowej regulacji prędkości obrotowej. Treść ilustrują schematy i szkice silników krokowych.

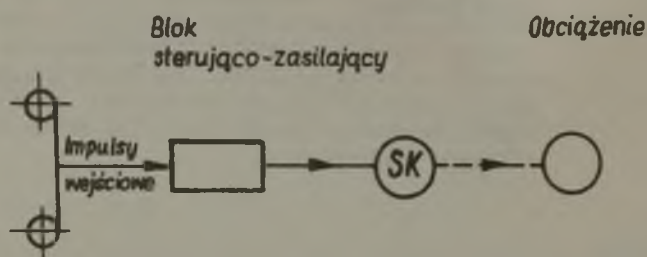
1. Wprowadzenie

W miarę postępu automatyzacji szczególnego znaczenia nabierają cyfrowe metody regulacji i sterowania programowego układów napędowych. Informacja w postaci cyfrowej podawana na wejście układu sterowania lub regulacji jest przetwarzana przez układ na wielkość mechaniczną o postaci analogowej np. kąt obrotu, prędkość. Jeśli to przetwarzanie odbywa się przy udziale konwencjonalnych silników jako członów wykonawczych, wówczas mamy do czynienia z rozbudowanym układem, gdyż w przetwarzaniu informacji muszą uczestniczyć dodatkowe urządzenia w postaci konwertorów cyfrowo-analogowych. Znaczne uproszczenie struktury układu osiąga się przez zastąpienie tych konwencjonalnych organów wykonawczych silnikami krokowymi (zwanymi również silnikami skokowymi [2]).

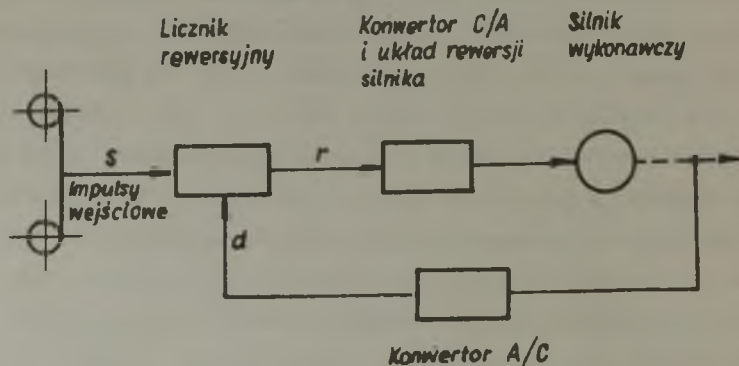
Silnik krokowy jest elektromechanicznym członem wykonawczym przetwarzającym impulsy prądowe w katowe krokowe przemieszczenia wirnika. Jest zatem elementem mogącym bezpośrednio powiązać cyfrowe urządzenia elektroniczne z układem mechanicznym. Z uwagi na impulsowe sterowanie i na krokowe przemieszczanie wirnika, jego charakter pracy odbiega od konwencjonalnych silników elektrycznych.

2. Porównanie napędu z silnikiem krokowym z cyfrowym napędem śledzącym

Mówiąc o napędzie z silnikiem krokowym należy mieć na uwadze nie tylko sam silnik krokowy, lecz cały zespół napędowy, w skład którego wchodzi również blok sterująco-zasilający z przetwornicą częstotliwości i zasilaczem regulowanym. Zespół taki może pracować w układzie otwartym jak na rys. 1. W zestawieniu ze stosowanymi układami śledzącymi zastosowanie silników krokowych daje poważne uproszczenia, co wynika z porównania rys. 1 z rys. 2.



Rys. 1. Napęd krokowy w układzie otwartym



Rys. 2. Cyfrowy układ śledzący

Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy cyfrowego układu śledzącego z przetwarzaniem impulsów wejściowych w dyskretne przyrosty kąta obrotu wału silnika napędowego. Funkcje węzła sumacyjnego pełni tutaj licznik rewersyjny.

Na marginesie trzeba zaznaczyć, że istnieje również druga odmiana cyfrowych układów śledzących, pracujących na zasadzie przetwarzania informacji wprowadzanej w postaci kodu liczbowego w kąt obrotu wału. W takiej odmianie miejsce licznika rewersyjnego zajmuje układ sumatora. Stosując - zamiast cyfrowego napędu śledzącego - napęd krokowy w układzie otwartym, uzyskuje się następujące korzyści:

- 1) zwiększenie pewności działania przez uproszczenie struktury,
- 2) zmniejszenie kosztów w związku z ograniczeniem liczby członów,
- 3) powiększenie precyzji działania.

3. Działanie silnika krokowego

Układ napędowy z silnikiem krokowym jest układem synchronicznym, w którym jest możliwa skokowa zmiana częstotliwości impulsów zasilających od zera do określonej maksymalnej wartości wyznaczonej własnościami dynamicznymi układu. Sam silnik krokowy, jest zmodyfikowaną maszyną synchroniczną z m-fazowym zespołem uzwojeń sterujących wzbudzanych prostokątnymi impulsami napięcia dostarczonymi przez elektroniczny blok sterująco-zasilający.

Częstotliwość impulsów sterujących podlega skokowym bądź nieregularnym zmianom stosowanie do zadanego programu. Przy tego rodzaju zmianach częstotliwości silnik krokowy musi wchodzić w synchronizm bez utraty tzw. kroku.

Podobnie, jak to ma miejsce przy maszynach synchronicznych, silniki krokowe można klasyfikować ze względu na liczbę uzwojeń sterujących (liczbę faz) oraz ze względu na sposób wzbudzenia systemu magnetycznego (silniki z wirnikiem biernym lub czynnym).

Przy konstrukcji silników krokowych są pożądane:

- a) możliwie mały moment bezwładności wirnika,
- b) duża liczba biegunów zezwalająca na uzyskanie możliwie małych przemieszczeń jednostkowych wirnika (kroków).

Wyrażony w radianach geometryczny kąt obrotu wirnika przy jednorazowej komutacji zasilania uzwojeń sterujących (zwany poskokiem krokowym [1] lub krótko krokiem):

$$\vartheta_M = \frac{\pi}{pm} \quad (1)$$

gdzie:

m - liczba niezależnych uzwojeń sterujących przesuniętych wzajemnie w przestrzeni,

p - liczba par biegunów silnika.

Prędkość obrotowa silnika krokowego:

$$\Omega_M = \vartheta_M f \quad (2)$$

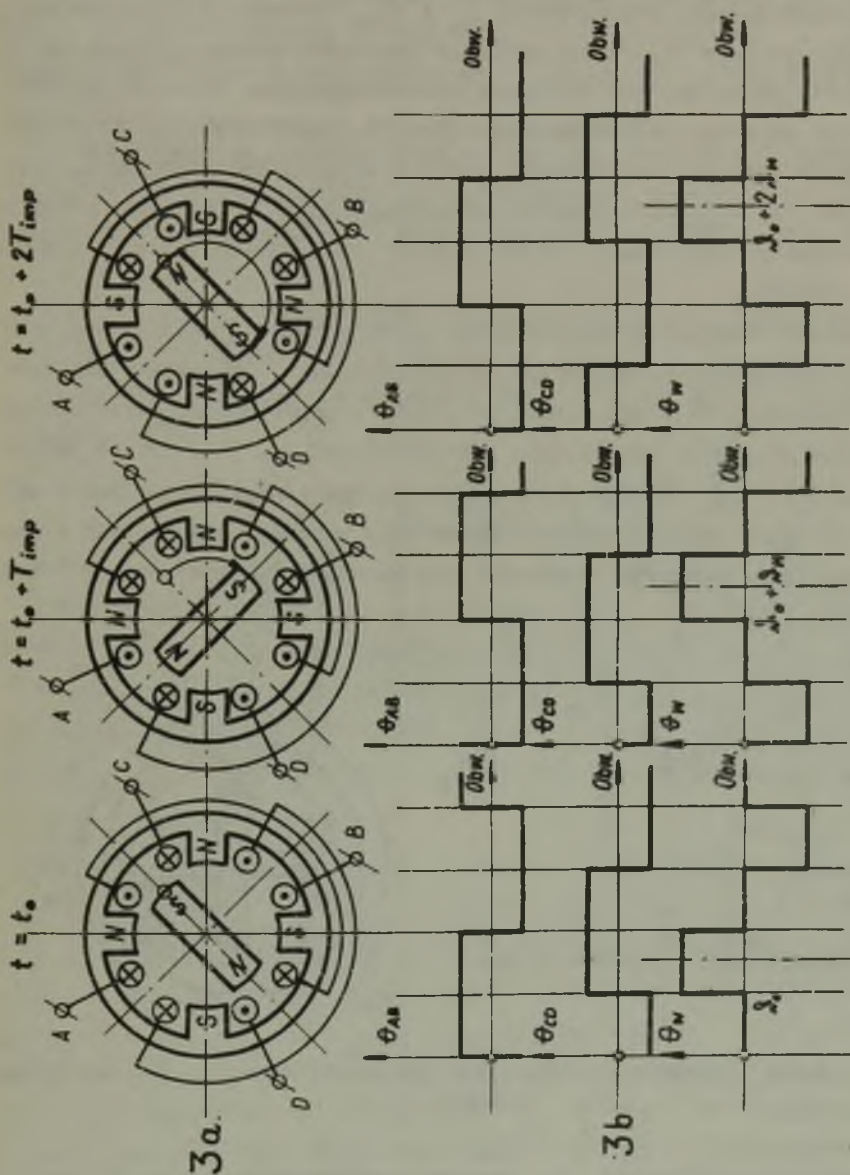
gdzie

f - częstotliwość impulsów sterujących.

Z równania (1) wynika, że mechaniczny krok można zmniejszyć zwiększając liczbę biegunów i uzwojeń sterujących silnika. Cechą silników z wirnikiem czynnym tzn. z magnesami trwałymi lub z uzwojeniem wzbudzenia na wirniku, jest stosunkowo duża wartość kąta kroku ($15-22,5^\circ$), co ma związek z technologią wykonania. Takie silniki mogą pracować przy stosunkowo małej częstotliwości i z dużą prędkością obrotową, głównie w napędach z reduktorem.

Silniki z uzębionym wirnikiem biernym tzn. bez uzwojenia wzbudzenia są wykonywane z małą wartością kroku ($1,5-3^\circ$) [5]. Mogą one pracować przy dużej częstotliwości impulsów sterujących lecz przy małej prędkości wirowania.

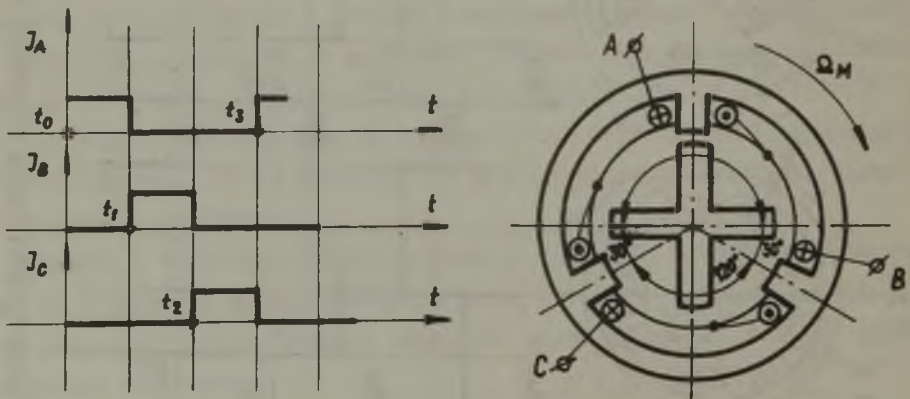
Zasadę działania 2-fazowego silnika krokowego z wirnikiem czynnym nazywanego również silnikiem krokowym magnetoelektrycznym ilustruje częściowy cykl pracy pokazany na rys. 3a,b. Przedstawiony schematycznie zespół uzwojeń sterujących składa się z dwóch nie powiązanych ze sobą galwanicznie uzwojeń fazowych, z których jedno jest oznaczone literami AB, a drugie CD.



Rys. 3. Wykresy ilustrujące działanie 2-fazowego silnika krokowego z wirnikiem czynnym

Na rys. 3a przedstawiono położenia krokowe wirnika, a na rys. 3b przestrzenny rozkład przepływów Θ_{AB} i Θ_{CD} uzwojeń sterujących oraz wypadkowy przepływ Θ_W w przedziałach czasowych między czterema kolejno po sobie następującymi impulsami przełączającymi. Rysunek wyjaśnia dyskretny charakter przemieszczania wirnika, odpowiednio do kroków występujących w procesie komutacji prądów w uzwojeniach sterujących. Przy zaznaczonym na wykresach sposobie dokonywania zmian kierunku prądu w zespole uzwojeń sterujących (w kolejności BA-DC-AB-CD...) wirnik obraca się w prawo.

Przeciwny kierunek przemieszczania nastąpi przy zmianie kierunku prądu w uzwojeniach w kolejności DC-BA-CD-AB... Dla zmiany kierunku przemieszczania, w jednym z uzwojeń należy przeprowadzić dwie kolejno po sobie następujące zmiany, np. AB-CD-DC-BA-CD... Na rys. 4 przedstawiono działanie silnika z wirnikiem biernym (nazywanego również silnikiem krokowym reluktancyjnym). Ustawienie wirnika, jak na rys. 4 spowodowane jest przepływem uzwojenia A. Przez uzwojenia sterujące B i C



Rys. 4. Szkic wyjaśniający działanie silnika krokowego z wirnikiem biernym

prąd nie płynie. W chwili t_1 następuje przełączenie prądu do uzwojenia B i wirnik przemieszcza się o 30° pod wpływem momentu reluktancyjnego w kierunku oznaczonym strzałką. Kolejne przemieszczenie - krok

(o kąt 30°) nastąpi przy załączeniu uzwojenia sterującego C w chwili t_2 . W chwili t_3 rozpoczyna się powtórzenie opisanego cyklu. Zmieniając porządek cykliczny występowania impulsów prądowych w zespole uzwojeń sterujących można doprowadzić do zmiany kierunku przemieszczania wirnika.

W modelu silnika o różnej liczbie biegunów w stojanie i wirniku geometryczny kąt obrotu wirnika przy jednorazowej komutacji uzwojeń sterujących wynika z równania (1) przy podstawieniu większej liczby par biegunów p .

W reluktancyjnym silniku krokowym liczba zębów z_r uzębionego wirnika określa liczbę biegunów $2p$.

W zastosowaniu do reluktancyjnego silnika krokowego równanie (1) przyjmuje postać:

$$\vartheta_M = \frac{2\pi}{z_r m} \quad (3)$$

Przemieszczanie się wirnika silnika krokowego jest uzależnione od warunków narzuconych częstotliwościowym sterowaniem prędkości kątowej.

W zależności od sposobu podawania ciągu impulsów sterujących, wyodrębniamy następujące trzy główne stany pracy silników krokowych:

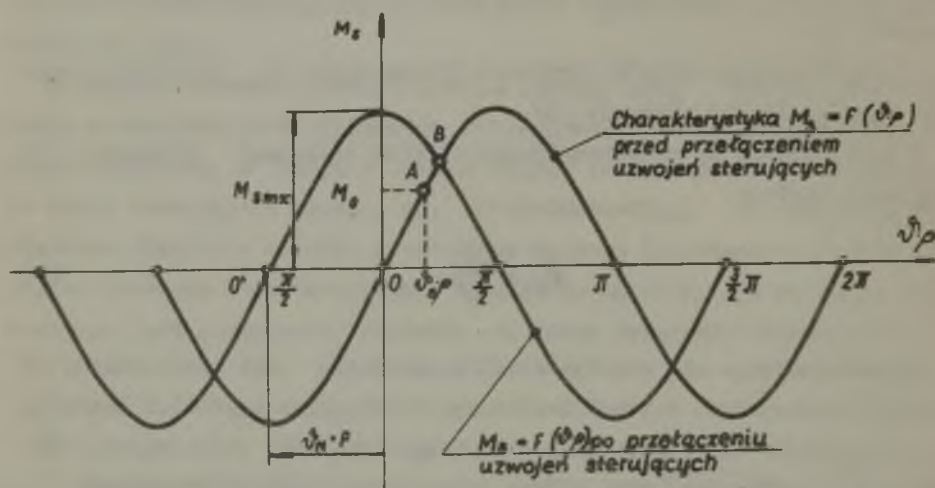
- 1) statyczny stan pracy,
- 2) quasistatyczny stan pracy,
- 3) stany dynamiczne.

W statycznym stanie pracy silnika krokowego przez uzwojenia sterujące płynie prąd stały, wytwarzając nieruchome pole magnetyczne. W tym stanie wirnik jest zahamowany i zajmuje położenie równowagi na skutek istnienia dwóch przeciwdziałających momentów: momentu obciążenia M_o oraz statycznego momentu synchronizującego M_s wytwarzanego przez silnik. Statyczny moment synchronizujący M_s zależy od geometrycznego kąta niezgodności φ_p między osią bieguna wirnika i osią wypadkowego przepływu stojana. Przebieg statycznego momentu synchronizującego w funkcji kąta φ_p można z wystarczającą dokładnością aproksymować sinusoidą:

$$M_s = M_{\text{smx}} \sin \varphi_p$$

Na rys. 5 pokazano dwie aproksymowane charakterystyki $M_s = f(\vartheta_p)$ przesunięte względem siebie w fazie o kąt obrotu $\vartheta_M p$ po jednorazowym przełączeniu uzwojeń sterujących. Przy zrównoważeniu momentów

$$M_{\text{smx}} \sin \vartheta_p + M_o = 0 \quad (4)$$



Rys. 5. Aproksymowane charakterystyki statycznego momentu synchronizującego

Kąt niezgodności w statycznym stanie pracy

$$\vartheta_S p = \arcsin\left(\pm \frac{M_o}{M_{\text{smx}}}\right) \quad (5)$$

Jak wynika z rys. 5 i równania (5), maksymalny kąt niezgodności $\vartheta_{\text{smx}} p = \pm \frac{\pi}{2}$ występuje przy $M_o = M_{\text{smx}}$.

W normalnych warunkach $\vartheta_M p < \frac{\pi}{2}$, ponieważ silnik krokowy nie jest przystosowany do pracy przy obciążeniu momentem M_{smx} . Maksymalna dopuszczalna wartość momentu obciążenia M_{omx} jest wyznaczona przez punkt przecięcia dwóch charakterystyk $M_s = f(\vartheta_p)$ przesuniętych o $\vartheta_M p$.

Quasistatyczny stan pracy silnika krokowego charakteryzuje się tym, że proces przejściowy (zwykle o przebiegu oscylacyjnym) towarzyszący krokowym przemieszczeniom wirnika zostaje zakończony przed kolejnym przełączeniem prądu w zespole uzwojeń sterujących. Oznacza to, że prędkość kątowna na początku każdego przemieszczenia wirnika o jeden krok jest równa zero. Maksymalna częstotliwość impulsów sterujących, przy której występuje jeszcze quasistatyczny stan pracy, jest ograniczona czasem zanikania oscylacji wokół każdorazowego położenia równowagi. Zwiększenie tej częstotliwości jest osiągalne poprzez wytłumienie oscylacji. Tłumienie oscylacji wirnika wynika z naturalnych własności konstrukcyjnych silnika krokowego. Przez wykorzystanie odpowiedniego układu sterowania elektronicznego można uzyskać dodatkowe tłumienie oscylacji wirnika. Najbardziej radykalna metoda tłumienia oscylacji polega na wymuszonym hamowaniu za pośrednictwem specjalnych układów elektronicznych. W czasie hamowania jest wytracana energia kinetyczna wirnika nabyta w trakcie przemieszczania o kolejny krok.

Można wyodrębnić następujące stany dynamiczne silnika krokowego: rozruch, hamowanie, zmiana kierunku wirowania i zmiana prędkości przy zmianie częstotliwości impulsów sterujących.

Rozruch silnika odbywa się zazwyczaj począwszy od położenia równowagi statycznej. Przy skokowym wzroście częstotliwości następuje kolejno:

- 1) opóźnione przemieszczenie wirnika w stosunku do przemieszczenia wypadkowego wektora przepływu,
- 2) osiągnięcie przez wirnik prędkości kątowej pola, a następnie wyprzedzenie położenia wirnika względem przemieszczającego się wektora wypadkowego przepływu,
- 3) zmniejszenie prędkości kątowej wirnika w wyniku przemieszczenia do strefy działania ujemnego momentu synchronizującego.

Wirnik nie powinien przy rozruchu zająć położenia poza tak zwaną strefą stabilności dynamicznej, w której przy opóźnianiu się wirnika względem przepływu moment synchronizujący jest dodatni, a przy wyprzedzaniu ujemny. Maksymalna częstotliwość impulsów sterujących, przy któ-

rej możliwe jest jeszcze przeprowadzenie rozruchu silnika ze stanu spoczynku (z położenia równowagi statycznej) bez wypadania z synchronizmu (bez straty kroków) określa częstotliwość rozruchową f_r [2] (zwaną również częstotliwością zrywu [1] lub częstotliwością startu).

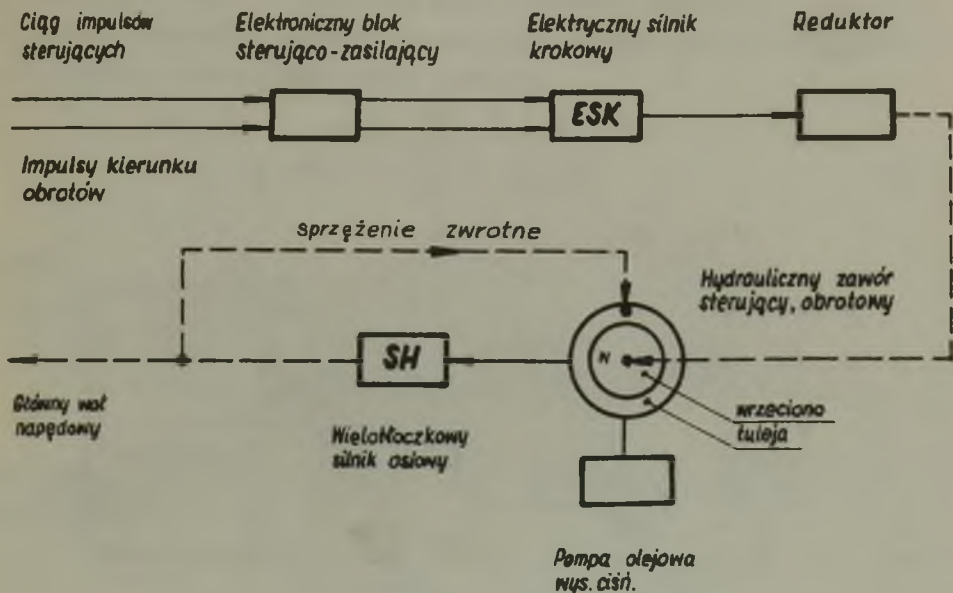
Przy skokowym zmniejszeniu do zera częstotliwości impulsów sterujących następuje hamowanie wirnika. Maksymalny spadek częstotliwości ciągu impulsów, przy którym hamowanie wirnika odbywa się bez wybiegu z zachowaniem synchronizmu jest na ogół większy od częstotliwości rozruchowej f_r .

Częstotliwość impulsów sterujących, przy której następuje zmiana kierunku wirowania silnika bez wypadania z synchronizmu, jest z reguły mniejsza od częstotliwości rozruchowej f_r .

4. Elektrohydrauliczny silnik krokowy

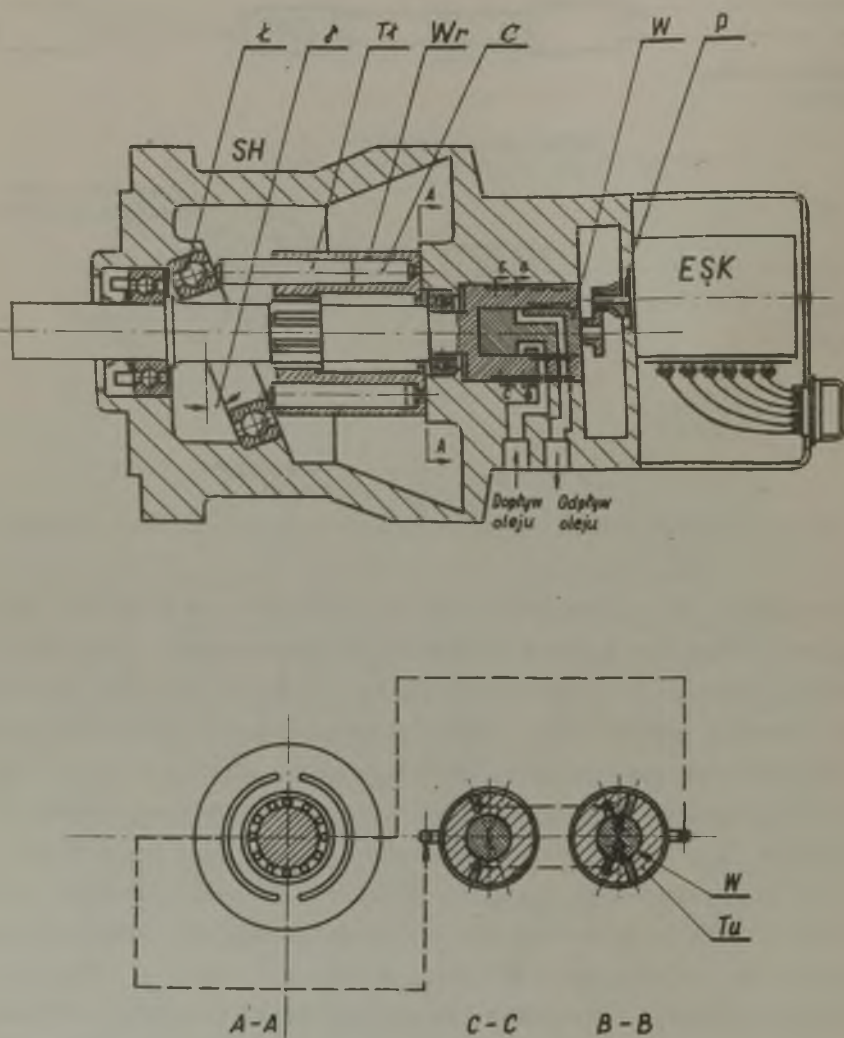
W wyniku oddziaływania pola magnetycznego w szczelinie na wirnik, powstają siły promieniowe i styczne działające na wirnik. Siły styczne są znacznie mniejsze od sił promieniowych, zatem dla osiągnięcia dużego momentu obrotowego konieczne są odpowiednio duże wymiary konstrukcyjne silnika. Uzyskanie małego momentu bezwładności wirnika i równocześnie dużego momentu synchronizującego jest utrudnione. Wynikają stąd trudności przy konstrukcji elektrycznego silnika krokowego o dużym momencie obrotowym i jednocześnie o dużej prędkości obrotowej. Radykalne zwiększenie momentu obrotowego przy dobrych parametrach dynamicznych można uzyskać w elektrohydraulicznym silniku krokowym złożonym z elektrycznego silnika krokowego małej mocy i hydraulicznego wzmacniacza momentu.

Na rys. 6 pokazano schemat takiego układu. Szttywne lokalne sprzężenie zwrotne obejmuje tylko wzmacniacz hydrauliczny. Zasadnicze elementy elektrohydraulicznego silnika krokowego przedstawiono na rys. 7. Elektryczny silnik krokowy o mocy ułamkowej ESK steruje dopływ oleju o ciśnieniu ok. 70 atn do hydraulicznego przestrzennego silnika osiowego [3] SH, który spełnia funkcję organu wykonawczego.



Rys. 6. Schemat układu z elektrohydraulicznym silnikiem krokowym

Wrzeciono W rozdzielacza obrotowego (zaworu sterującego) jest połączone z wirnikiem silnika krokowego za pośrednictwem przekładni P , natomiast tuleja Tu tego rozdzielacza - z wałem silnika hydraulicznego. Każdemu impulsowi na wejściu elektronicznego bloku sterująco-zasilającego towarzyszy kątowne przemieszczenie wirnika silnika sterującego o pojedynczy krok, powodujące obrót wrzeciona rozdzielacza o określony kąt α_2 . W miarę przemieszczania się wrzeciona zaczyna się otwierać kanał doprowadzający olej do cylindrów C hydraulicznego silnika osiowego. Siła jaką wywiera olej na część tłoków $Tł$ umieszczonych w wirniku Wr silnika osiowego posiada dwie składowe, z których jedna działa w płaszczyźnie czołowej tarczy wychylnej (łożyska oporowego L) i wytwarza moment obrotowy, a druga jest równoważona przez reakcję łożyska. Pozostała część tłoków nie uczestniczy w wytwarzaniu momentu obrotowego, ponieważ nie jest pod działaniem wysokiego ciśnienia. Wytłacza ona olej do magistrali odprowadzającej. Pod wpływem momentu wirnik silnika hydraulicznego rozpoczyna ruch obrotowy wraz z połączoną z nim mechanicznie tuleją Tu rozdzielacza. Mechaniczne połączenie wału



Rys. 7. Elektrohydrauliczny silnik krokowy

roboczego z tuleją Tu wprowadza pętlę ujemnego sztywnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza hydraulicznego. Silnik hydrauliczny bez sprzężenia zwrotnego wykazuje własności całkujące:

$$K(p) = \frac{\alpha_R(p)}{\alpha_Z(p)} = \frac{k}{p(1+Tp)} \quad (7a)$$

gdzie:

$\alpha_R(p)$ - transformata kąta obrotu wału roboczego,

$\alpha_Z(p)$ - transformata kąta obrotu wrzeciona rozdzielacza,

T - stała czasowa zawierająca się w granicach $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-1} s$,

k - wzmocnienie członu całkującego.

Przy pominięciu małej stałej czasowej T równanie (7a) przyjmie postać

$$K(p) = \frac{k}{p} \quad (7b)$$

W przypadku przestrzennego silnika osiowego o stałym nachyleniu tarczy wychylnej, kąt obrotu wału roboczego jest proporcjonalny do objętości oleju, który przepłynął przez silnik, czyli jest proporcjonalny do całki prędkości przepływu oleju. Ponieważ prędkość przepływu oleju jest proporcjonalna do stopnia otwarcia rozdzielacza, zatem kąt obrotu wału α_R jest proporcjonalny do całki kąтового przemieszczenia α_Z elementu sterującego drożnością rozdzielacza

$$\frac{d\alpha_R}{dt} = k\alpha_Z \quad (8)$$

Sztywne ujemne sprzężenie zwrotne zmienia transmitancję wzmacniacza hydraulicznego

$$\frac{\alpha_R(p)}{\alpha_Z(p)} = \frac{k}{k+p} \quad (9)$$

Z takim sprzężeniem zwrotnym człon wykonawczy wykazuje cechy członu inercyjnego pierwszego rzędu. Przemieszczenia kątowe wrzeciona w rozdzielaczu są odtwarzane przez wał roboczy silnika hydraulicznego z pewną inercją. Każdy krok silnika sterującego jest odtwarzany przez wzmacniacz hydrauliczny z uchybem kątowym δ mniejszym od wartości kroku. Po zakończeniu krokowego przemieszczenia wirnika silnika krokowego, a wraz z nim wrzeciona rozdzielacza, zostaje zamknięta droga dla przepływu oleju i w konsekwencji następuje zahamowanie silnika hydraulicznego. Pokazane na rys. 7 w przekroju B-B wzajemne usytuowanie elementów rozdzielacza jest jednakowe przed rozpoczęciem kolejnego kroku i po jego zakończeniu.

Tablica 1

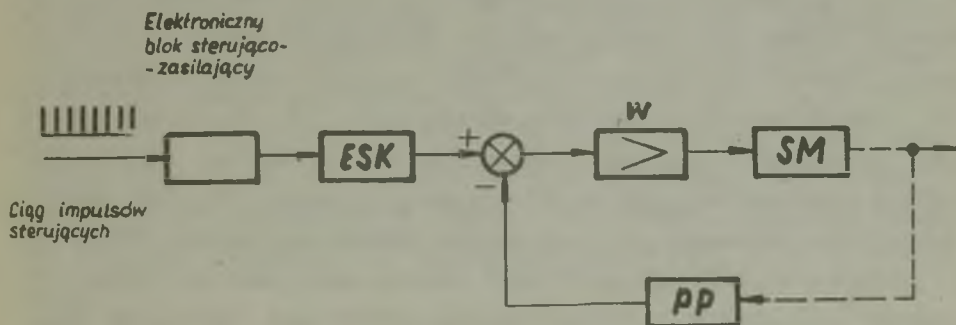
Typ zespołu	Jedn.	0	1	2
Wartość kroku na wyjściu	o/imp	3	3	7,5
Maksymalna częstotliwość ciągu impulsów w ruchu ciągłym	Hz	1000	1000	1000
Częstotliwość rozruchowa	Hz	500	500	500
Moment roboczy przy 500 Hz i 70 kg/cm ²	kGcm	1000	200	20
Moc wyjściowa przy 500 Hz i 70 kg/cm ²	kW	2,6	0,52	0,13

W tablicy 1 przedstawiono podstawowe parametry elektrohydraulicznego silnika krokowego produkcji japońskiej firmy FUJITSU wykonanego w trzech różnych wielkościach typowych [9].

Należy podkreślić, że przytoczone parametry odnoszą się do jednej z pierwszych wersji wykonania. Wg opublikowanych ostatnio przez tę firmę danych (marzec 1970) moce produkowanych obecnie elektrohydraulicznych silników krokowych dochodzą do 15 kW, a maksymalna częstotliwość ciągu impulsów (w ruchu ciągłym) osiąga wartość 16 kHz.

5. Zastosowanie silników krokowych

Korzystne własności silnika krokowego można najlepiej wyzyskać w układzie sterowania (w otwartym układzie regulacji). Można wyodrębnić dwa charakterystyczne układy sterowania napędów z silnikiem krokowym (rys. 6 i rys. 8). W układzie na rys. 6 silnik krokowy spełnia funkcję członu wykonawczego za pośrednictwem wzmacniacza momentu. Taki układ sterowania z elektrohydraulicznym silnikiem krokowym może stanowić typowe rozwiązanie napędu przesuwnych części obrabiarek (suporty, sianie, stoły, wrzecienniki) z zastosowaniem sterowania numerycznego. Elektryczny silnik krokowy steruje tutaj bezpośrednio hydraulicznym organem wykonawczym. W drugim przypadku przedstawionym na rys. 8 silnik krokowy wytwarza sygnał sterujący wprowadzany na wejście układu śledzącego. Elektryczny silnik krokowy ESK przetwarza ciąg impulsów w przemieszczenie kątowe. Sygnał proporcjonalny do tego przemieszczenia jest podawany na wejście układu śledzącego, złożonego z wzmacniacza W, serwowatora SM oraz przetwornika położenia wału roboczego PP w obwodzie sprzężenia zwrotnego.

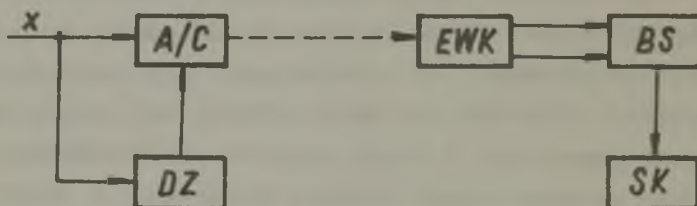


Rys. 8. Schemat układu śledzącego z elektrycznym silnikiem krokowym zadającym przemieszczenie kątowe

Funkcję węzła sumacyjnego w układzie śledzącym mogą pełnić mechaniczne i elektromechaniczne elementy (selsyny, potencjometry, mechanizmy różnicowe i inne).

Wyżej podane układy z silnikami krokowymi znajdują szerokie zastosowanie w programowym sterowaniu obrabiarek.

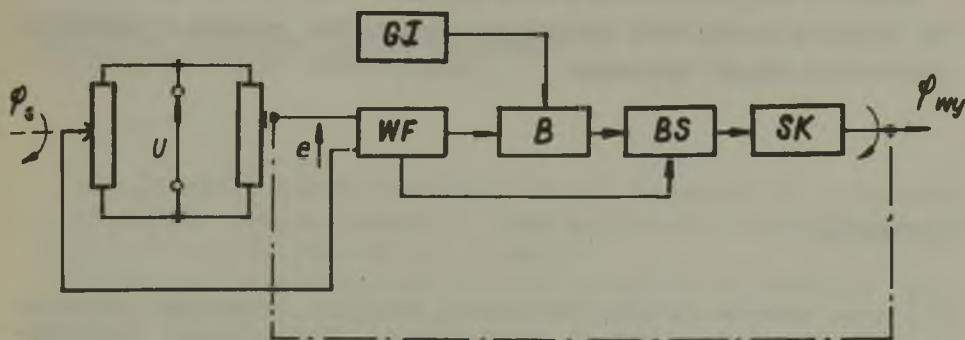
Spośród innych możliwości zastosowania silnika krokowego można wymienić przesyłanie informacji z punktów pomiarowych do centralnego ośrodka rejestracji. Zasadę działania takiego urządzenia wyjaśnia rysunek 9.



Rys. 9. Zastosowanie silnika krokowego w układzie zdalnego przesyłania informacji

Na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego A/C jest podawane napięcie proporcjonalne do wielkości fizycznej X . Na wyjściu A/C pojawia się ciąg impulsów o częstotliwości lub ilości proporcjonalnej do wartości liczbowej sygnału na wejściu. Biegunowość impulsów wyjściowych zależy od znaku mierzonej wielkości (np. od kierunku wirowania wału) i jest wyznaczona przez dyskryminator znaku DZ. Na stronie odbiorczej element wyboru kierunku EWK wprowadza impulsy na odpowiednie wejście elektronicznego bloku sterująco-zasilającego BS. Kąt obrotu wału silnika krokowego SK jest liniową funkcją analogowej wielkości X podlegającej rejestracji. Silniki krokowe nadają się do układu sterowania jeśli warunki w jakich przebiega odtwarzanie informacji wejściowej nie powodują zakłóceń w pracy synchronicznej silnika. Jeśli zachodzi obawa zniekształcenia informacji przez wystąpienie zakłóceń, zachodzi konieczność stosowania zamiast układów sterowania układów regulacji z silnikami krokowymi.

Na rys. 10 przedstawiono schemat blokowy układu śledzącego z członem wykonawczym w postaci silnika krokowego. Wielkością wejściową podlegającą odtworzeniu przez układ śledzący, jest kąt obrotu φ_s wału ste-



Rys. 10. Schemat układu śledzącego z członem wykonawczym w postaci silnika krokowego

rującego. Odchyłka e po modulacji i wzmacnieniu przez wzmacniacz fazoczuły WF otwiera drogę impulsom podawanym z generatora GI na wejście elektronicznego bloku sterująco-zasilającego BS , poprzez oddziaływanie na element bramkujący B . Informacja określająca kierunek wirowania silnika, jest przekazywana dodatkowym wejściem do bloku BS z wzmacniacza WF . Przesmyczenia katowe wirnika silnika krokowego przenoszą się na wejście układu za pośrednictwem pętli sprzężenia zwrotnego w sposób zapewniający ostateczną likwidację odchyłki e . Wskutek tego kąt obrotu φ_{wy} wału wyjściowego jest równy kątowi φ_s wału sterującego. Odchyłka e jest likwidowana przy maksymalnej dopuszczalnej prędkości obrotowej silnika krokowego. Częstotliwość generatora impulsów GI jest dostosowana do dynamicznych parametrów silnika krokowego.

6. Wnioski

Zalety silnika krokowego można dobrze wyzyskać w niektórych napędach zautomatyzowanych. Silnik krokowy wiąże bezpośrednio elektroniczne układy sterowania numerycznego i regulacji cyfrowej z urządzeniem napędzanym.

W związku z pojawieniem się nowych elementów techniki półprzewodnikowej istnieją szczególnie sprzyjające warunki dla rozwoju i ulepszenia konstrukcji napędu krokowego.

LITERATURA

- [1] Praca zbiorowa Katedry Konstrukcji Aparatów Automatyki Politechniki Śląskiej pod red. H. Kowalowskiego: "Laboratorium elektromechanicznych i magnetycznych elementów automatyki", Gliwice 1967.
- [2] Borkowski J., Sochocki R.; "Silniki skokowe". Przegląd elektrotechniczny, 1970, nr 1.
- [3] Trybalski Z.; "Urządzenia i układy automatyki cz. II". Elementy hydrauliczne". Politechnika Śląska, Gliwice 1969.
- [4] Iwobotienko B.A.; "Szagowyje elektrodwigatielei". Elektricestwo 1960, nr 8.
- [5] Ismailow Sz.J.; "Awtomaticzeskije sistemy i pribory z szagowymi dwigatelami". "Energia", Moskwa 1968.
- [6] "Mikroelektrodwigatielei dla sistem awtomatiki" (techniczeskij sprawocznik) pod red. Łodoczniaka E.A., Jufierowa J.M. "Energia", Moskwa 1969.
- [7] Wasiliew J.K., Rabalczenko J.I., Kabkow G.J., Łarczenko W.I., Łanowoj W.G., Taszkiewicz W.K., Zajcewa E.T.; "Seria szagowych elektrodwigatielej obszcze-promyszlennogo primienienija". Elektrotechnika 1970, nr 4.
- [8] Ahrendt W.R., Savant C.J.; "Servomechanism Practice". McGraw-Hill Book Comp., 1960.
- [9] Kaiwa, Inaba; "Electrohydraulic Pulse Motor", Control Engineering, January 1962.

Przyjęto do druku w czerwcu 1970 r.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Р е з ю м е

Рассматриваются вопросы применения шаговых двигателей в современном электроприводе, включая структурные схемы управления и автоматического регулирования и конструкции шаговых двигателей.

Описываются особенности работы шаговых двигателей, определенных широким диапазоном частотного регулирования скорости.

PERSPECTIVES OF APPLICATION OF A STEPPER MOTOR IN
AUTOMATIC DRIVE

S u m m a r y

In this article are examined questions related to application of stepper motors in a modern electric drive. There are discussed block diagrams of control and feedback - control and stepper motor - design.

There are described some distinctive features of the stepper motors - work, resulting from a large frequency range in the velocity control conditions.