

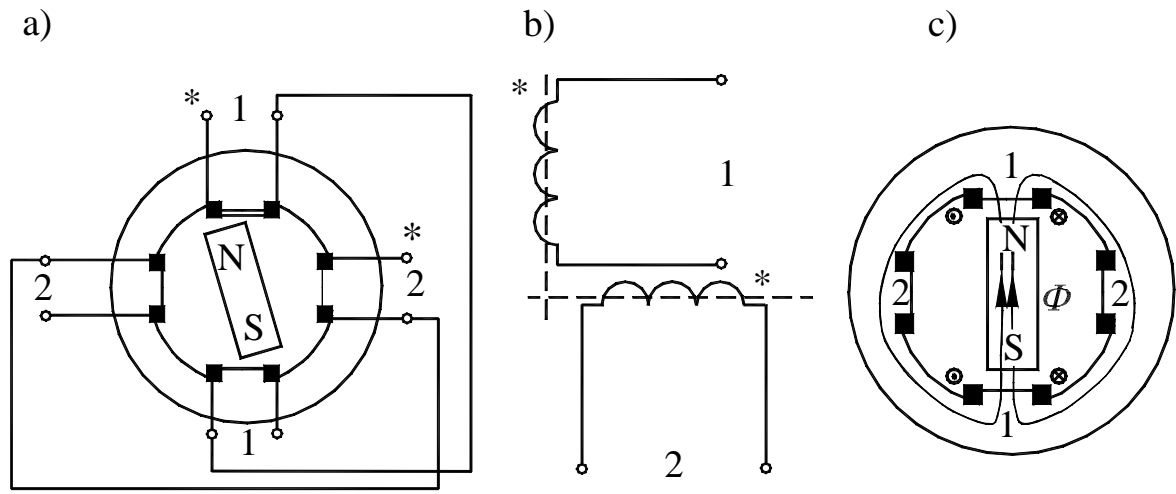
## **ĆWICZENIE 6**

### **SILNIK SKOKOWY HYBRYDOWY**

#### **Wprowadzenie**

Silnik skokowy jest to elektromechaniczny przetwornik energii charakteryzujący się dyskretnym przemieszczeniem mechanicznym. Sygnał elektryczny sterujący takim silnikiem składa się z ciągu impulsów sterujących, przy czym każdy kolejny impuls powoduje obrót wirnika o ściśle określony kąt zwany skokiem. Znanych jest kilka rodzajów silników skokowych: magnetoelektryczne – o wirniku czynnym i reluktancyjne – o wirniku biernym, jak również silniki hybrydowe.

Silnik skokowy magnetoelektryczny charakteryzuje się wirnikiem zbudowanym z magnesów trwałych. Przykładowo, praca silnika mającego uzwojenie stojana dwufazowe przebiega następująco: po zasileniu jednej fazy napięciem o dodatniej biegunowości wytwarza się strumień magnetyczny w osi uzwojenia stojana. Wirnik ustawia się wzdłuż tego strumienia, tak by przewodność magnetyczna na drodze strumienia była jak największa. Kolejny skok wirnika otrzyma się, zasilając napięciem drugie uzwojenie stojana. Wielkość skoku (kąt obrotu wirnika) zależy od liczby biegunów wirnika, czyli sposobu, w jaki został on namagnesowany i od sposobu komutacji prądu w uzwojeniach stojana (przykładowo, mogą być zasilane uzwojenia 1,2,1 itd. lub 1,12,2,21,1 itd.). Budowę i zasadę działania silnika skokowego magneto-elektrycznego pokazano na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Silnik skokowy magnetoelektryczny: a) model silnika, b) schemat uzwojeń, c) zasada działania – uzwojenie „1” zasilone prądem, wirnik ustawił się w osi biegunów (wzdłuż osi strumienia wytworzonego przez uzwojenie)

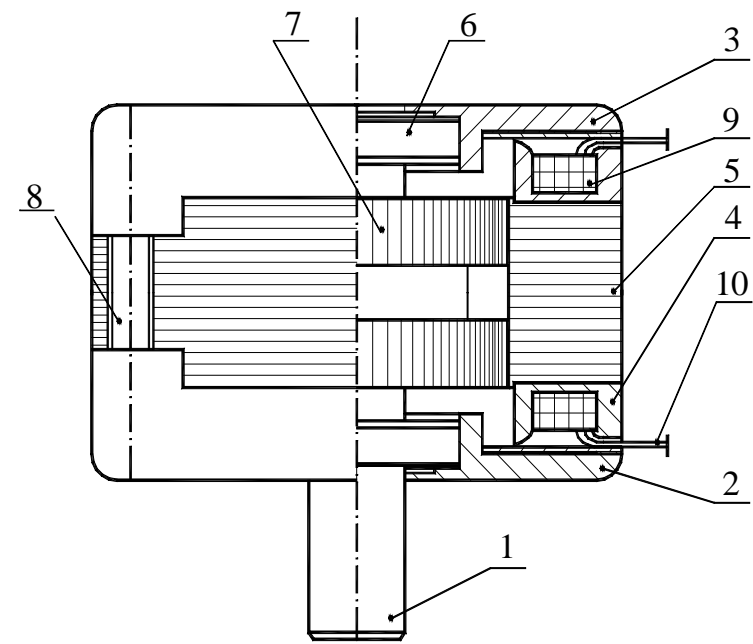
Silnik skokowy reluktancyjny ma wirnik zbudowany z materiałów magnetycznych miękkich. Moment obrotowy takiego silnika wynika z istnienia różnej reluktancji magnetycznej w osiach maszyny (co najmniej dwóch). Stojan jest uzwojony podobnie jak w silniku magnetoelektrycznym. Wirnik natomiast skonstruowany jest tak, że szczelina powietrzna między stojanem a wirnikiem jest nierównomierna, wobec czego reluktancja obwodu magnetycznego jest zmienna.

Z punktu widzenia użytkownika różnica między pracą silnika skokowego z wirnikiem czynnym i biernym polega na tym, że wirnik silnika reluktancyjnego obraca się swobodnie, gdy uzwojenia stojana nie są zasilane, natomiast w silniku z wirnikiem czynnym istnieje pewien moment spoczynkowy, utrzymujący wirnik w zadanym położeniu, nawet po wyłączeniu zasilania.

### Budowa i działanie silnika skokowego hybrydowego

Nazwa silnik hybrydowy wiąże się z wykorzystaniem do generacji momentu elektromagnetycznego dwóch zjawisk: zmiennej reluktancji i strumienia wzbudzenia wytworzonego przez magnes trwały. Na rysunku 6.2 zaprezentowano konstrukcję silnika skokowego hybrydowego, a elementy jego obwodu magnetycznego zaprezentowano na rys. 6.3. Wirnik składa się z dwóch ferromagnetycznych wieńców (1) z naciętymi zębami  $Z_2$  ( $Z_2 = 50$ ), między którymi osadzony jest magnes trwały (2)

(najczęściej SmCo lub NdFeB) o kształcie pierścienia, a całość jest zamocowana na niemagnetycznym wałku (3).

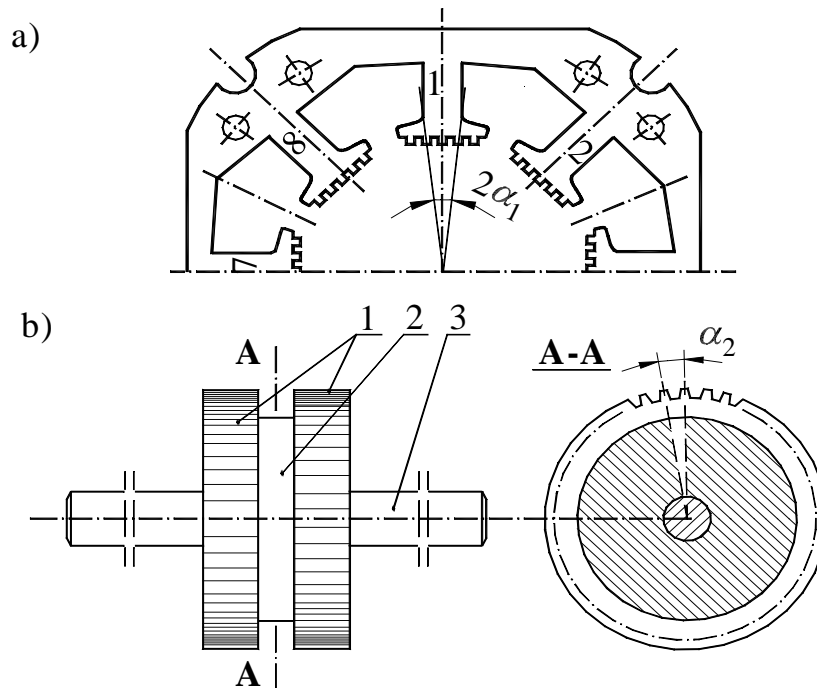


Rys. 6.2. Konstrukcja silnika skokowego hybrydowego: 1 – wał, 2 i 3 – tarcze łożyskowe, 4 – karkas, 5 – pakiet blach stojana, 6 – łożyska, 7 – wirnik, 8 – śruba mocująca, 9 – uzwojenie, 10 – końcówki przewodów

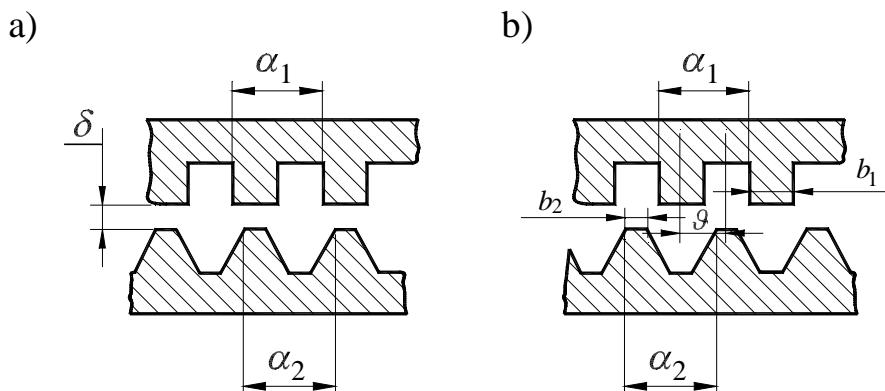
Wieńce, obrócone względem siebie o kąt  $\frac{1}{2}\alpha_2$ , są wykonane z materiału o dużej permeancji osiowej i promieniowej i dużej indukcji nasycenia ( $B > 2$  T). Warunek ten spełnia żelazo armco. Chodzi o to, aby zęby wirnika nie nasycyły się. Obwód magnetyczny stojana jest pakietowany z blachy ferromagnetycznej o małej stratności, a to z uwagi na dużą częstotliwość przemagnesowania (do 1 kHz). Pakiet stojana zawiera zęby duże ponumerowane od 1 do 8 i zęby małe o podziałce  $\alpha_1$ .

Na zębach dużych nawinięte jest uzwojenie 2-fazowe. Każda faza ma pasma przeciwnie spolaryzowane. Faza AB zawierająca pasma A i B jest nawinięta na zębach nieparzystych, faza CD na zębach parzystych – rys.6.3 a. Duże zęby stojana (od 1 do 8) nie są biegunami silnika, o biegunowości silnika decyduje uzwojenie. W tym przypadku uzwojenie ma 4 bieguny. Podziałki zębowe stojana ( $\alpha_1$ ) i wirnika ( $\alpha_2$ ) powinny być równe lub zbliżone, gdyż determinują one generację momentu elektromagnetycznego. Jeśli zęby małe stojana pokrywają się z zębami wieńca wirnika (rys. 6.4a), wówczas reluktancja szczeliny powietrznej jest minimalna  $R_{\min}$ , jeśli

natomiast zęby wieńca wirnika pokrywają się ze zębami stojana (rys. 6.4b), wówczas reluktancja szczeliny jest maksymalna  $R_{\max}$ .



Rys. 6.3. Elementy obwodu magnetycznego silnika skokowego hybrydowego: a) wykroj blachy stojana, 1,2...8 – duże zęby stojana,  $\alpha_1$  – podziałka zębów małych; b) wirnik, 1 – wieńce ferromagnetyczne, 2 – magnesy trwałe, 3 – niemagnetyczny wałek,  $\alpha_2$  – podziałka zębów wirnika



Rys. 6.4. Położenie wirnika względem stojana: a) reluktancja minimalna, b) reluktancja maksymalna

Każde inne położenie wirnika względem stojana daje reluktancję pośrednią. Parametry elektromechaniczne silnika zależą od stosunku reluktancji  $R_{\max}/R_{\min}$ . Aby

ten stosunek był możliwie duży, szczelina  $\delta$  powinna być możliwie mała ( $\delta < 0,05$  mm), zęby stojana i wirnika nienasycone, a kształty zębów odpowiednio wyprofilowane. Zwykle kształt zębów stojana jest prostokątny, a kształt zębów wirnika zbliżony do trapezu. Kąty  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  mogą być sobie równe  $\alpha_1 = \alpha_2$ . Rozwiązanie takie jest jednak niekorzystne, gdyż przy różnej szerokości zębów  $b_1 > b_2$  otrzymuje się strefę nieczułości  $\Delta\alpha$ , w której reluktancja szczeliny jest stała. Ma to wpływ na wartość błędu pozycjonowania wirnika po wykonaniu skoku

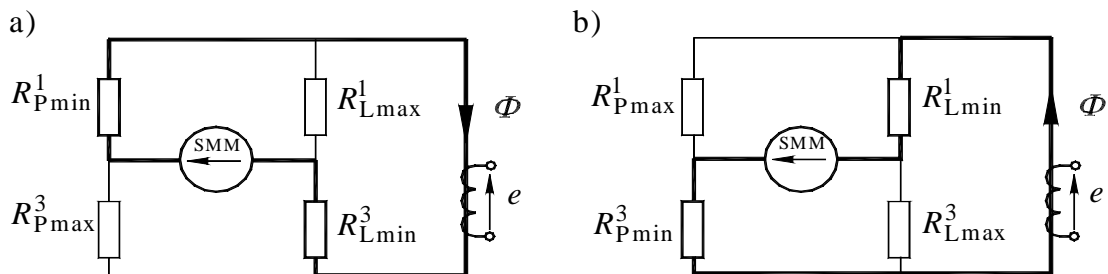
$$\Delta\vartheta = \frac{2(b_1 - b_2)}{D}, \quad (6.1)$$

gdzie  $D$  – średnica wirnika.

Znacznie korzystniejsze rozwiązanie jest wtedy, gdy kąty  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  spełniają warunek

$$\frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{\alpha_2} - \frac{1}{\pi}. \quad (6.2)$$

Spełnienie warunku (6.2) eliminuje strefę nieczułości.



Rys. 6.5. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego silnika skokowego hybrydowego: a) dla stanu, w którym zęby prawego wieńca wirnika pokrywają się z zębami pod zębem dużym 1 ( $R_{p\min}^1$ ), b) dla stanu, w którym zęby lewego wieńca wirnika pokrywają się ze żłobkami pod dużym zębem 1 ( $R_{p\max}^1$ )

Zasadę działania silnika skokowego hybrydowego zilustrowano na podstawie schematu zastępczego obwodu magnetycznego silnika przedstawionego na rys. 6.5. Na schemacie tym założono, że reluktancja szczeliny między prawym wieńcem wirnika a dużym zębem (1) stojana jest minimalna  $R_{p\min}^1$ , a między lewym wieńcem wirnika a dużym zębem (1) stojana jest maksymalna  $R_{L\max}^1$ , natomiast pod dużym zębem stojana (3) jest odwrotnie  $R_{L\min}^3$ ,  $R_{p\max}^3$ . Ponieważ  $R_{\min} \ll R_{\max}$ , więc strumień

magnetyczny  $\Phi$ , sprzężony z uzwojeniem stojana, a wzbudzany przez siłę magneto-motoryczną (SMM) magnesu trwałego będzie miał kierunek zgodny ze strzałką na rys. 6.5a. Jeśli wirnik obrócić o kąt  $\frac{1}{2}\alpha_2$ , to wszystkie reluktancje szczeliny powietrznej między wieńcami wirnika i dużymi zębami stojana (1) i (3) zmieniają swoje wartości z minimalnych na maksymalne oraz z maksymalnych na minimalne (rys. 6.5b). Zmiana ta powoduje, że strumień  $\vec{\Phi}$  sprzężony z uzwojeniem zmienia kierunek na przeciwny. Rewersja strumienia sprzężonego z uzwojeniem indukuje napięcie:

$$e = z \frac{d\Phi}{d\vartheta} \frac{d\vartheta}{dt}. \quad (6.3)$$

Jeśli założy się, że strumień w funkcji kąta  $\vartheta$  ma przebieg cosinusoidalny

$$\Phi(\vartheta) = \Phi \cos 2\pi \frac{\vartheta}{\alpha_2}, \quad (6.4)$$

to napięcie rotacji

$$e = \frac{2\pi}{\alpha_2} z \Phi \left[ \sin 2\pi \frac{\vartheta}{\alpha_2} \right] \frac{d\vartheta}{dt}, \quad (6.5)$$

gdzie  $z$  – liczba zwojów, a  $\vartheta$  – kąt bieżący między osią małego zęba stojana a osią zęba wirnika (rys. 6.4).

Podobnie można rozpatrzeć generowanie momentu elektromagnetycznego. Po załączeniu na uzwojenie fazy A napięcia  $u_A$  prąd  $i_A$  i moment synchronizujący  $M_A$  będą opisywać równania:

$$\begin{aligned} u_A &= R i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + i_A \frac{dL_A}{d\vartheta} \frac{d\vartheta}{dt}, \\ M_A(\vartheta) &= \frac{2\pi}{\alpha_2} z \Phi \left[ \sin 2\pi \frac{\vartheta}{\alpha_2} \right] i_A, \end{aligned} \quad (6.6)$$

gdzie:  $R_A$  i  $L_A$  oznaczają rezystancję i indukcyjność uzwojenia fazy A.

Moment synchronizujący  $M_A(\vartheta)$  zgodnie z równaniem opisującym dynamikę ruchu

$$\frac{d^2\vartheta}{dt^2} = \frac{1}{J} \left[ M_A(\vartheta) - M_{\text{obc}} - D \frac{d\vartheta}{dt} \right] \quad (6.7)$$

spowoduje ustawienie wirnika w takie położenie, w którym  $M_A(\vartheta) = M_{\text{obc}}$ .

W równaniu (6.7)  $M_{ob}$  i  $D$  oznaczają statyczny moment obciążenia i współczynnik tłumienia.

Po wyłączeniu napięcia z fazy A i załączeniu napięcia na fazę C cykl pracy powtarza się, a wirnik wykona następny skok o kąt

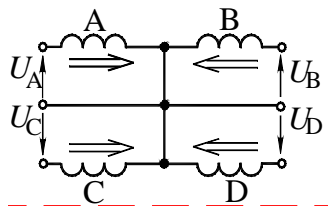
$$\vartheta_s = \frac{2\pi}{2pZ_2} = \frac{180^\circ}{pZ_2}, \quad (6.8)$$

gdzie:  $p$  – liczba par biegunów.

Dla silnika o liczbie biegunów  $2p = 4$  i liczbie zębów wirnika  $Z_2 = 50$  kąt skoku  $\vartheta_s = 1,8^\circ$ .

Dalsze wyłączenie i załączenie napięcia na kolejne fazy B,D,A itd. (rys. 6.6, 6.7a) powoduje wykonanie kolejnych skoków. Liczba skoków wirnika na jeden pełny obrót wynosi w tym przypadku

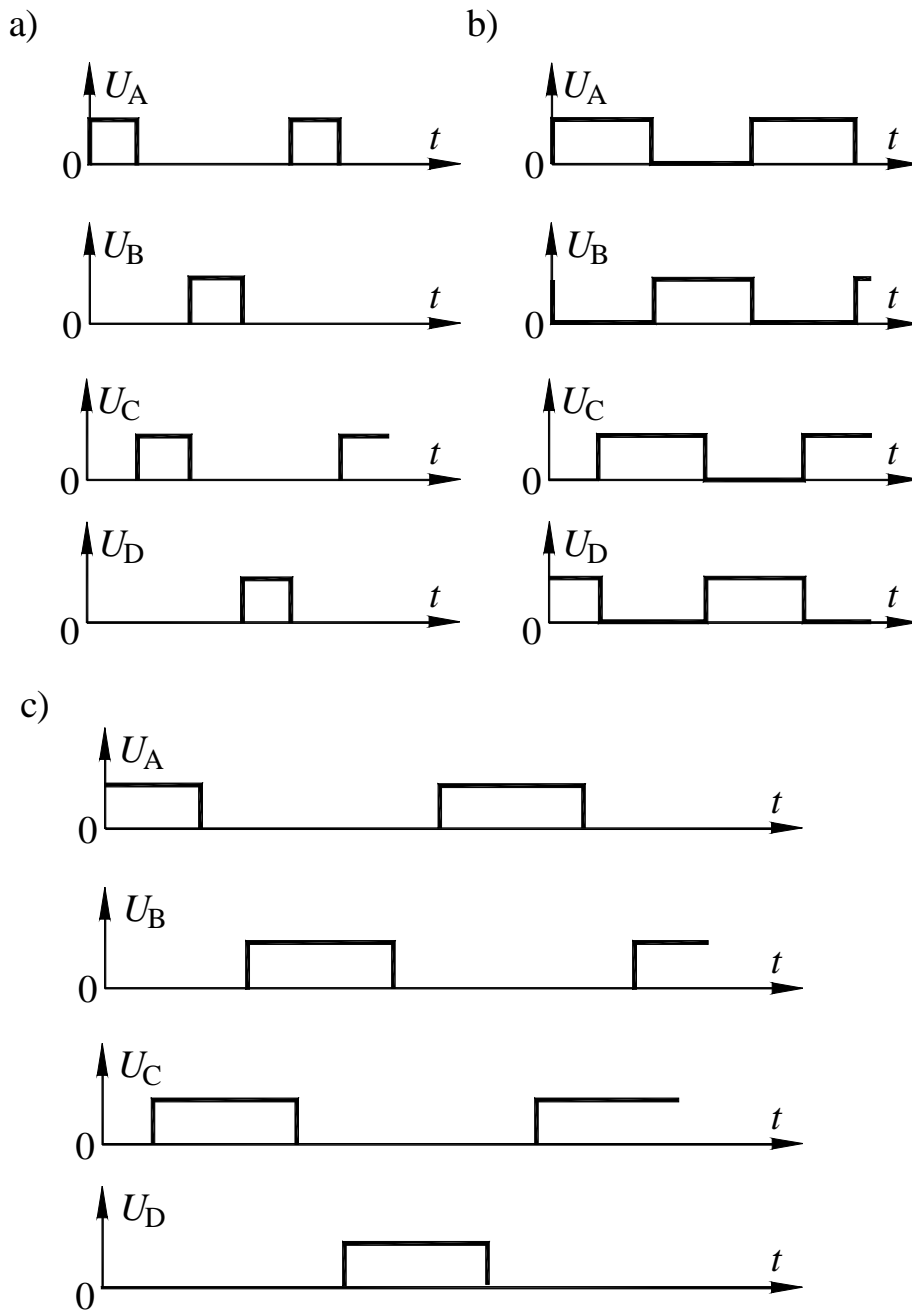
$$k_s = \frac{360^\circ}{\vartheta_s} = 200.$$



Rys. 6.6. Schemat uzwojeń silnika skokowego

Większy moment synchronizujący silnika można uzyskać zasilając sekwencyjnie napięciem zawsze dwa uzwojenia: AC, CB, BD, DA, AC itd. – rys. 6.7b. W tym przypadku zarówno kąt skoku, jak i liczba skoków na jeden obrót ( $k_s = 200$ ) nie ulegną zmianie.

Silnik może być także sterowany w ten sposób, że kąt jednego skoku jest o połowę mniejszy  $\left(\frac{1}{2}\vartheta_s\right)$ , a liczba skoków na jeden obrót dwukrotnie większa ( $2k_s = 400$ ).



Rys. 6.7. Praca silnika skokowego: a), b) kolejność załączania napięcia na poszczególne uzwojenia silnika przy cyklu pracy 200-skokowym na jeden obrót silnika, c) kolejność załączania napięcia na poszczególne uzwojenia silnika przy 400-skokowym cyklu pracy na jeden obrót silnika

Sterowanie „półskokami” przedstawiono na rys.6.7c. W tym przypadku napięcie jest załączane i wyłączane kolejno na fazy: DA, A, AC, C, CB, B, BD, D, DA, A itd.

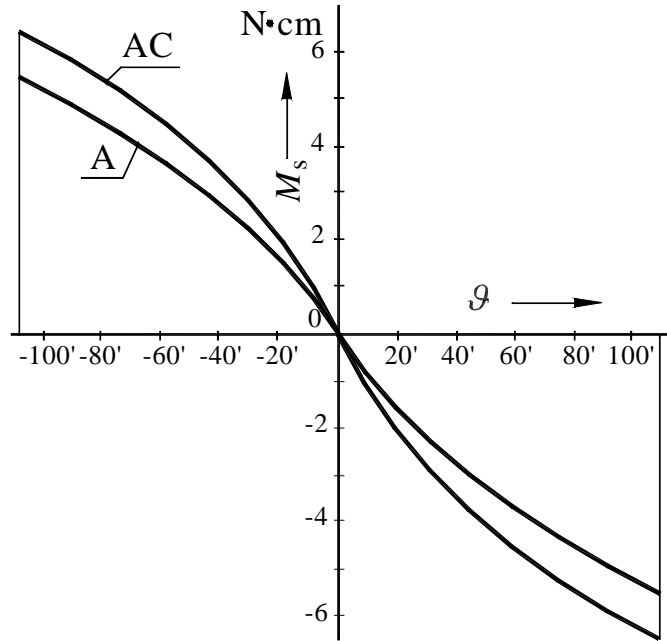


## **Charakterystyki elektromechaniczne silnika skokowego hybrydowego**

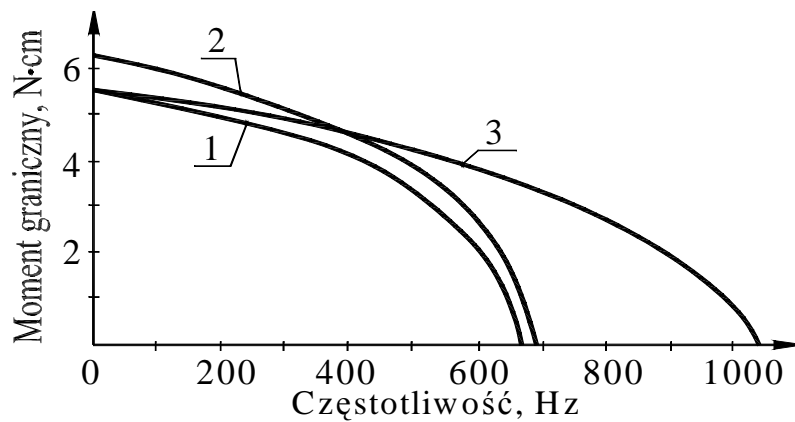
Właściwości elektromechaniczne silnika skokowego hybrydowego opisują charakterystyki:

- statycznego momentu synchronizującego w funkcji kąta  $\vartheta$  określającego położenie wirnika względem stojana przy zasilaniu napięciem  $U$  jednego pasma uzwojenia (np. A) i dwóch pasm uzwojenia (np. AC) (rys. 6.8) (prąd w uzwojeniach silnika ma wartość ustaloną – praca statyczna),
- momentu granicznego  $M_g$  w funkcji częstotliwości impulsowania  $f$  przy zasilaniu sekwencyjnym jednego pasma (rys. 6.6b) i dwóch pasm (rys. 6.6c) oraz przy zasilaniu mieszanym (rys. 6.6d), to jest w cyklu pracy 400-skokowym na jeden obrót (rys. 6.8). Dla momentu obciążenia większego od granicznego silnik wypada z synchronizmu i traci zdolność sterowania (czas drgań swobodnych wirnika jest dłuższy od czasu trwania impulsu sterującego – wirnik „nie nadąża” za impulsami sterującymi).

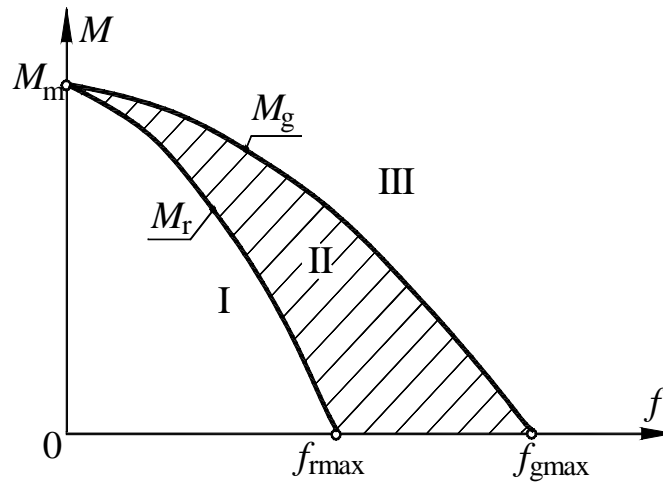
Praca dynamiczna silnika skokowego jest to praca w czasie rozruchu, rewersji (nawrotów) obrotów lub zmiany częstotliwości impulsowania. Rozruch silnika następuje z położenia spoczynkowego wirnika po załączeniu na uzwojenia stojana napięcia z częstotliwością impulsowania  $f_r$ . Już w czasie pierwszego impulsu silnik wpada w synchronizm i na każdy kolejny impuls napięcia odpowiada skokiem. Jeśli jednak częstotliwość impulsowania jest zbyt duża, to silnik nie wejdzie w synchronizm i będzie gubił skoki. Właściwości rozruchowe silnika określa maksymalna częstotliwość rozruchu  $f_r$ , przy której odpowiedzią na każdy impuls napięcia jest skok kąta  $\vartheta$ , tzn. silnik nie gubi skoków. Częstotliwość rozruchowa jest funkcją parametrów silnika, momentu bezwładności układu i momentu obciążenia. Częstotliwość tę opisuje charakterystyka  $M_r = f(f)$  (rys. 6.10).



Rys. 6.8. Charakterystyki statycznego momentu synchronizującego silnika PM200 przy zasilaniu pasma uzwojenia A i pasm uzwojeń A i C napięciem 12 V



Rys. 6.9. Charakterystyki momentu granicznego  $M_g$  w funkcji częstotliwości impulsowania, silnika PM200 przy napięciu zasilania 12 V: 1 – przy zasilaniu sekwencyjnym pojedynczych pasm uzwojenia A,B,C,D,A..., to jest w cyklu pracy 200 skoków na jeden obrót wirnika, 2 – przy zasilaniu sekwencyjnym pasm AC,CB,BD,DA,AC..., to jest w cyklu pracy 200 skoków na jeden obrót, 3 – przy zasilaniu sekwencyjnym mieszanym DA,A,AC,C,CB,B,BD,D,DA,A..., to jest w cyklu pracy 400 skoków



Rys. 6.10. Charakterystyki  $M_g(f)$  i  $M_r(f)$  silnika skokowego

Rozruch silnika przy dużym momencie obciążenia jest możliwy, jeśli częstotliwość impulsowania jest mniejsza od częstotliwości  $f_r$ .

Jeżeli przejście z jednej częstotliwości impulsowania na drugą odbywa się płynnie, to silnik może pracować poprawnie przy wyższych od  $f_r$  częstotliwościach impulsowania. Taki rodzaj pracy silnika skokowego charakteryzuje częstotliwość graniczna  $f_g$ ; jest to największa częstotliwość impulsowania napięcia przy płynnym powiększaniu częstotliwości, przy której silnik jeszcze nie gubi skoków. Częstotliwość graniczna, podobnie jak częstotliwość rozruchowa, jest funkcją parametrów silnika, momentu bezwładności układu i momentu obciążenia (rys. 6.10).

Charakterystyki  $M_r(f)$  i  $M_g(f)$  rozdzielają pierwszą ćwiartkę układu współrzędnych na rys. 6.10 na trzy obszary I, II, III. W obszarze I silnik skokowy tak przy pracy kinematycznej, jak i dynamicznej pracuje poprawnie przy dowolnych (lecz  $f < f_r$ ) skokowych zmianach częstotliwości impulsowania. W obszarze II (zakreskowanym) jest możliwa poprawna praca kinematyczna silnika skokowego, w przypadku gdy zmiana częstotliwości impulsowania zachodzi w sposób płynny. W obszarze III silnik wypada z synchronizmu (gubi skoki bądź zatrzymuje się).

Częstotliwości  $f_r$  i  $f_g$  zależą od szybkości narastania prądu w uzwojeniach silnika i od jego wartości.

## **Zastosowanie silników skokowych**

Silnik skokowy hybrydowy jest stosowany w napędach: ploterów, komputerów, w sprzęcie wideofonicznym, a ostatnio także w samochodach. Główną zaletą tych silników jest duży moment przypadający na jednostkę masy. W silniku PM200, którego charakterystyki są podane na rys. 6.8 i 6.9, wskaźnik momentu na jednostkę masy wynosi 0,36 N·m/kg, podczas gdy w silnikach prądu stałego wskaźnik ten odniesiony do momentu znamionowego jest około 3 razy mniejszy. Wysoki wskaźnik momentu na jednostkę mocy w silnikach hybrydowych uzyskuje się dzięki magnesom trwałym o dużej energii (SmCo, NdFeB), jak również dzięki bardzo małej szczelinie (ok. 0,05 mm).

Drugą zaletą silnika skokowego hybrydowego jest moment reluktancyjny (w innego typu silnikach moment ten jest wadą), który utrzymuje położenie wirnika w stanie bezprądowym, uniemożliwiając jego przypadkowy obrót. Dla silnika PM200 maksymalna wartość momentu reluktancyjnego wynosi 0,8 N·cm, co stanowi około 15% statycznego momentu granicznego  $M_g$ , tzn. momentu określonego przy częstotliwości impulsowania  $f = 0$ .

Przy sterowaniu silnika skokowego niepotrzebna jest pętla sprzężenia zwrotnego od prędkości i pozycji wirnika.

Silniki skokowe hybrydowe są produkowane w kilku wielkościach o momencie statycznym od kilku N·cm do 30 N·m i masie od 150 g do 23 kg.

## **Opis stanowiska laboratoryjnego**

Stanowisko laboratoryjne składa się z silnika skokowego hybrydowego typu PM200 i sterownika (komutatora elektronicznego). Na wale silnika można zamontować kółko pasowe.

## **Działanie sterownika**

Układ jest sterowany odpowiednio oprogramowanym mikroprocesorem jednoukładowym AT89C2051 z rodziny MCS-51 (rys. 6.11).

Do zasilania układu wykorzystany został regulator napięciowy 7905 ograniczający napięcie na wyjściu do 5 V. Układ ten działa jak dzielnik napięcia,

stabilizując napięcie 5 V. Całe stanowisko jest zasilane z zewnętrznego zasilacza napięciem stałym 12 V.

Port *P3* wykorzystywany jest jako port wejściowy. Do jego wejść podłączonych jest 7 mikrostryków. W chwili gdy wyłącznik jest otwarty, na wejściu mikroprocesora jest sygnał wysoki 5 V (logiczna jedynka). W chwili zamknięcia wyłącznika napięcie +5 V jest zwierane do masy przez rezystor 10 k $\Omega$ , a na wejściu mikroprocesora pojawia się napięcie 0 V (logiczne zero).

Port *P1* wykorzystywany jest jako port wyjściowy. Wyjścia *P1.1* ÷ *P1.3* sterują tranzystorami, załączając i wyłączając napięcie na poszczególne uzwojenia silnika. W chwili gdy na wyjściu jest sygnał "1", baza tranzystora ma potencjał wysoki, a tranzystor typu BC-327 nie przewodzi. W chwili pojawienia się sygnału "0" tranzystor zaczyna przewodzić. Jednocześnie zapala się dioda LED sygnalizująca pracę danego zaworu (tranzystora). W podobny sposób załączane są diody LED dołączone do wyjścia *P1.4* ÷ *1.7* (diody sygnalizacyjne).

Ponieważ masa silnika znajduje się na potencjale -7 V, więc w chwili załączenia zaworu elektrycznego na uzwojeniu silnika pojawia się napięcie 12 V.

Schemat ideowy układu sterowania silnikiem skokowym przedstawiono na rysunku 6.11.

Oprogramowanie sterownika umożliwia:

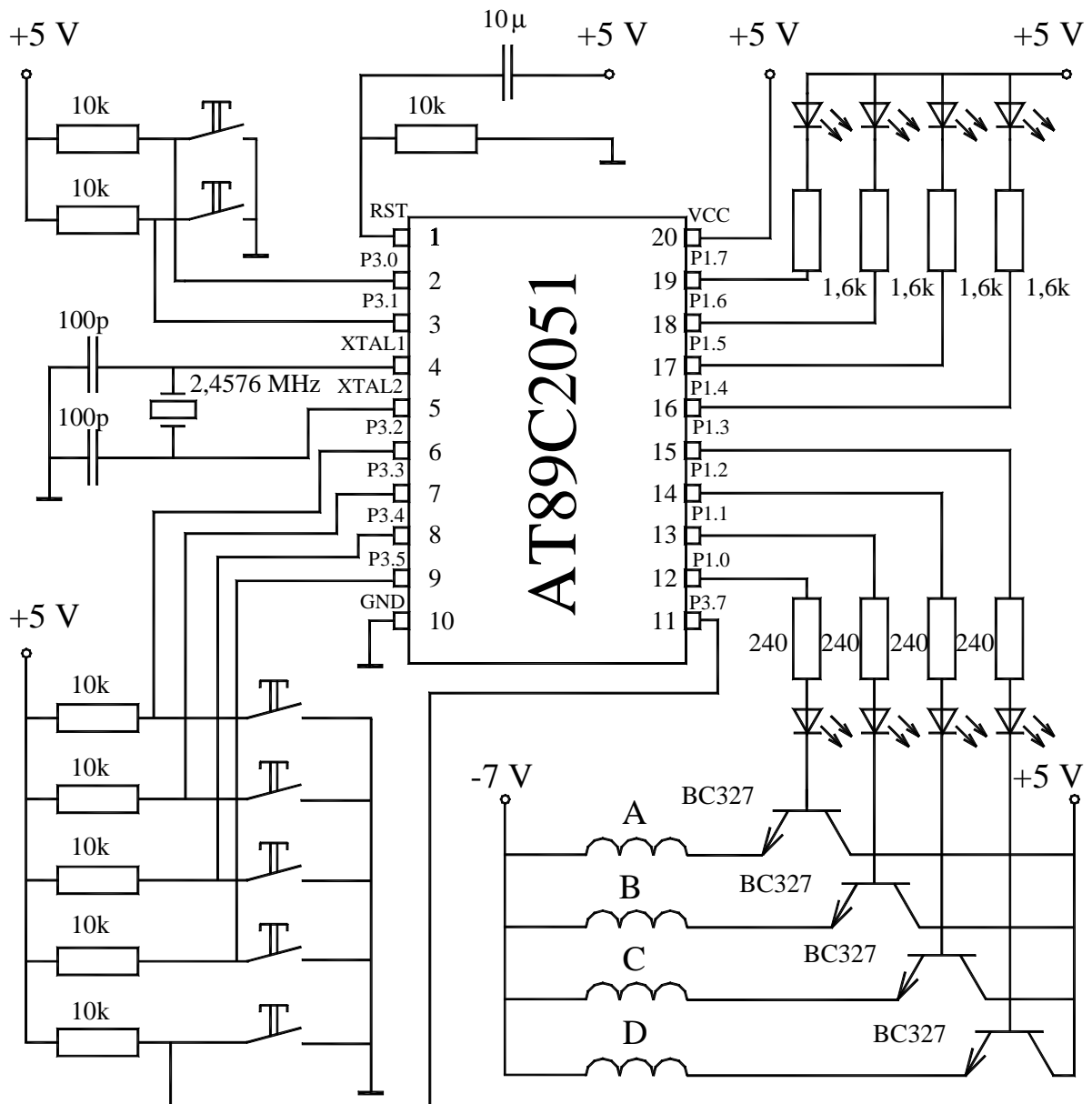
- tryb pracy automatyczny i ręczny (zadawanie pojedynczych skoków),
- regulację prędkości silnika przy sterowaniu automatycznym,
- wybór jednego z 3 możliwych cykli pracy silnika,
- wykonywanie pracy rewersyjnej (zmiany kierunku obrotów).

Na obudowie sterownika umieszczone są również 4 zielone diody sygnalizacyjne. Diody *D1* i *D2* informują o trybie pracy silnika (rodzaju sterowania), świecąca dioda trzecia sygnalizuje tryb pracy ręcznej silnika (naciskając klawisz „takt ręczny” powoduje się przełączenie napięcia na kolejną fazę lub fazy silnika i wykonanie pojedynczego skoku), dioda czwarta sygnalizuje kierunek obrotów silnika.

Zwiększenie lub zmniejszenie częstotliwości impulsów sterujących silnika odbywa się za pomocą klawiszy „+szybciej” lub „-wolniej”,

Dodatkowe 4 czerwone diody LED oznaczone „A”, „B”, „C” i „D” wizualizują sekwencję sterującą silnika.

Na obudowie z boku umieszczone jest gniazdo typu BNC, umożliwiające podgląd napięcia sterującego na uzwojeniu „D”.



Rys. 6.11. Schemat ideowy układu sterowania silnikiem skokowym

### Program ćwiczenia

#### 1) Oględziny

Rozebrać silnik skokowy hybrydowy, obejrzeć i zidentyfikować poszczególne elementy.

#### 2) Pomiar rezystancji uzwojeń

Rezystancję uzwojeń zmierzyć metodą techniczną.

3) Obserwacja pracy silnika skokowego

Przetestować działanie silnika skokowego w trzech różnych cyklach pracy silnika (200 i 400 skoków na obrót). Zaobserwować na oscyloskopie przebieg impulsu sterującego, zanotować jego kształt i czas trwania dla różnych częstotliwości pracy silnika.

4) Pomiar charakterystyki statycznego momentu synchronizującego

Charakterystykę tę mierzy się oddzielnie dla każdego zasilanego pasma uzwojenia lub dwóch pasm uzwojeń (zgodnie z istniejącymi sekwencjami sterowania, a więc A,B,C,D, DA AC, CB, BD). W trybie pracy sterownika „praca ręczna” należy podać napięcie na właściwe pasmo uzwojenia. Na wale silnika zamontować kółko pasowe o znanej średnicy z nawiniętym sznurkiem, do sznurka doczepić dynamometr. Zwiększając stopniowo przyłożoną siłę, wytrąca się silnik z położenia równowagi, mierząc jednocześnie siłę i kąt obrotu wirnika w zakresie od 0 do ok. 1°. Pomiaru należy przeprowadzić dla obu kierunków obrotów silnika.

5) Wyznaczenie maksymalnej częstotliwości rozruchowej

Pomiaru dokonuje się na biegu jałowym silnika. Dokonuje się prób rozruchu silnika przy różnych częstotliwościach, po każdym udanym rozruchu zatrzymując silnik i zwiększając częstotliwość (jednocześnie należy częstotliwość pracy mierzyć za pomocą oscyloskopu). Częstotliwość, przy której silnik nie ruszy poprawnie (tj. bez gubienia skoków), jest to maksymalna częstotliwość rozruchowa. Prób dokonać dla wszystkich trzech cykli pracy silnika.

6) Wyznaczenie maksymalnej częstotliwości nawrotu

Pomiar wykonuje się podobnie jak poprzednio. Silnik pracuje przy danej częstotliwości, w dowolnej chwili dokonuje się zmiany kierunku obrotów przez przestawienie odpowiedniego przełącznika w sterowniku. Częstotliwość, dla której nawrót (rewersja obrotów) nie zostanie dokonana poprawnie (tj. bez gubienia skoków), jest to maksymalna częstotliwość nawrotu. Prób dokonać dla wszystkich trzech cykli pracy silnika.

7) Wyznaczenie częstotliwości granicznej

Pomiaru dokonuje się na biegu jałowym silnika. Przy pracującym silniku należy stopniowo zwiększać częstotliwość impulsowania. Częstotliwość, przy której silnik zaczyna gubić skoki jest częstotliwością graniczną silnika. Prób dokonać dla wszystkich trzech cykli pracy silnika.

## **Literatura**

1. Rydzewski A.: Mikrokomputery jednocukładowe rodziny MCS-51. WNT, Warszawa 1992.
2. AT89C2051 8-Bit Microcontroller with 2 Kbytes Flash. Dokumentacja techniczna firmy ATMEL.