

Silniki skokowe – wstęp

Silniki skokowe, w odróżnieniu od innych silników, po włączeniu zasilania pozostaje w spoczynku lub wykonuje niewielki ruch do najbliższej pozycji spoczynkowej nazywanej pozycją równowagi stabilnej, a następnie zatrzymuje się mimo zasilania.

Każdy późniejszy ruch wirnika składa się ze skoków o stałej wartości kątowej i wymaga doprowadzenia z zewnątrz tylu impulsów sterujących, ile skoków ma wykonać wirnik.

Cechą charakterystyczną silników skokowych jest synchroniczne podążanie wirnika za polem magnetycznym wytwarzanym przez stojan. Pole stojana nie wiruje jednak ze stałą prędkością, jak w silnikach synchronicznych, lecz dyskretnie (skokowo) zmienia położenie kątowe. Pole to wytwarzane jest przez dwa lub więcej pasma uzwojenia.

Według PN-87/E-01006 silnik krokowy jest to silnik przekształcający ciąg sterujących impulsów elektrycznych na ciąg przesunięć kątowych lub liniowych.

Silniki skokowe w układach napędowych.

W układach napędowych stosuje się trzy rodzaje silników skokowych:

- magnetoelektryczne (typowa wartość skoku 120° , 90° , 60° , 45° , 30°);
- reluktancyjne (30° , 15° , $7,5^\circ$, 5° , 3°);
- hybrydowe (5° , 18° , $0,72^\circ$).

Oprócz wartości elementarnego skoku, drugim parametrem charakterystycznym pozwalającym określić obszar zastosowań silnika skokowego jest częstotliwość pracy synchronicznej. Parametr ten definiuje maksymalną prędkość obrotową silnika.

Układy napędowe z silnikami skokowymi były powszechnie stosowane w pierwszej generacji sterowanych numerycznie urządzeń technologicznych. W późniejszym okresie były one stopniowo wypierane przez charakteryzujące się wysoką jakością statyczną i dynamiczną napędy z silnikami prądu stałego. Zwiększające się zainteresowanie silnikami skokowymi jest wynikiem ich ogromnej zmiany jakościowej, spowodowanej wprowadzeniem mikroprocesorowych układów sterujących umożliwiających realizację bardzo złożonych funkcji sterowania.

Silniki skokowe stosowane są chętnie tam gdzie trzeba realizować ruch przerywany. Zastępują one kosztowne i często zawodne mechanizmy: sprzęgła, hamulce, mechanizmy krzywkowe i zapadkowe.

Silnik skokowy reluktancyjny.

Działanie silników skokowych reluktancyjnych oparte jest na różnicy zmian reluktancji obwodu magnetycznego wirnika i stojana przy zmianie kąta wirnika. Na rysunku niżej (rys.1) przedstawiono zasadę działania silnika krokowego reluktancyjnego na przykładzie silnika z 6 biegunami stojana ($N_s = 6$) i 4 biegunami wirnika ($N_r = 4$). Liczba nabiegunników N_s ($N_s = 6$) różni się od liczby nabiegunników wirnika N_r ($N_r = 4$). Liczba faz zasilania stojana wynosi q ($q = 3$). Zwykle liczba nabiegunników wirnika wynosi

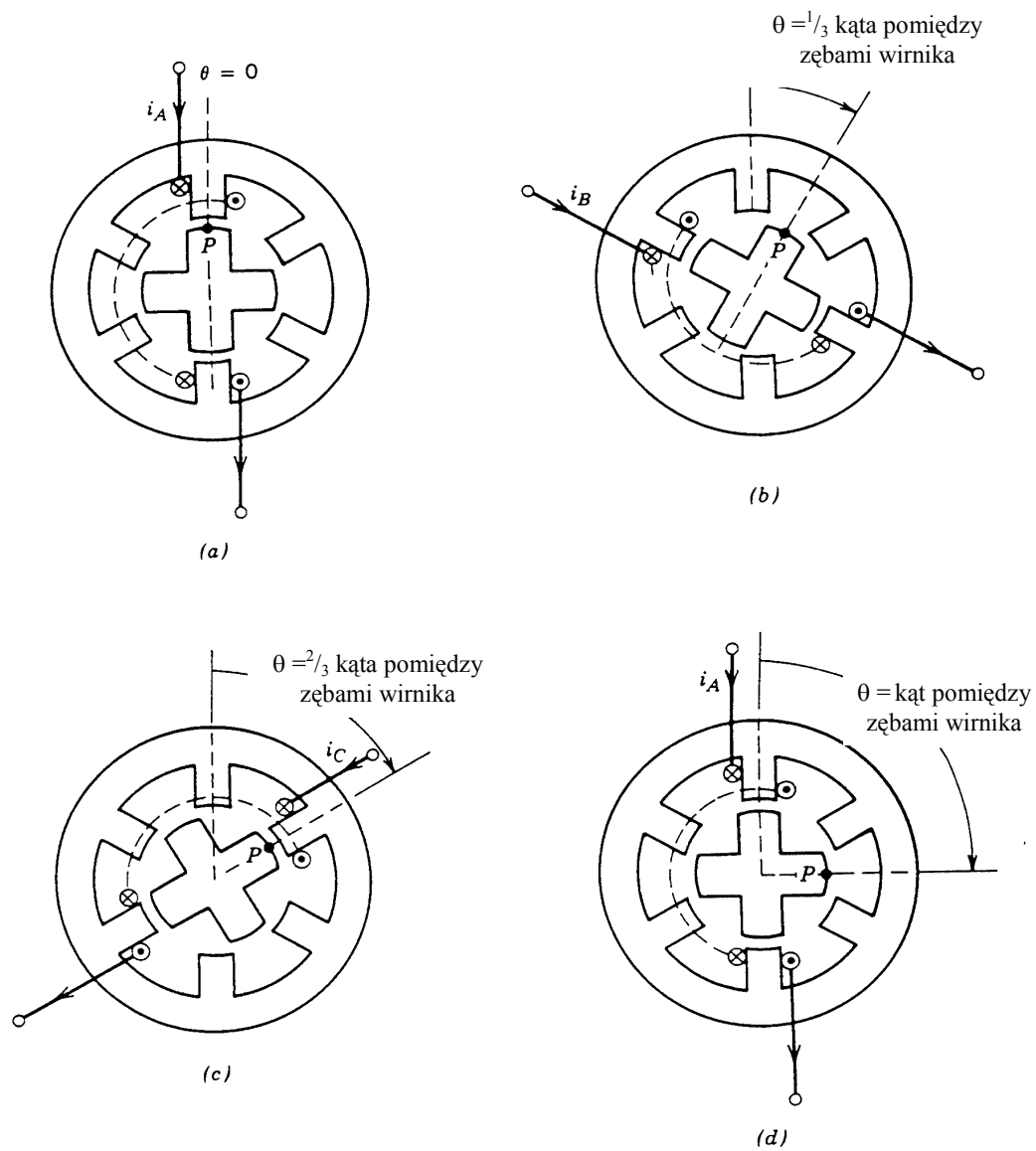
$N_r = N_s \pm (N_s/q)$. Czyli elementarny skok to $\theta = 1/3$ kąta pomiędzy zębami wirnika

W fazie A (Rys.1.a) przez uzwojenie płynie prąd i_A moment napędowy T_{em} ustawia wirnik w pozycji minimalnej oporności obwodu magnetycznego dla strumienia magnetycznego wzbudzonego w uzwojeniu A. Położenie katowe wirnika w fazie A bez momentu obciążającego przyjmujemy jako początkowe $\Theta = 0$.

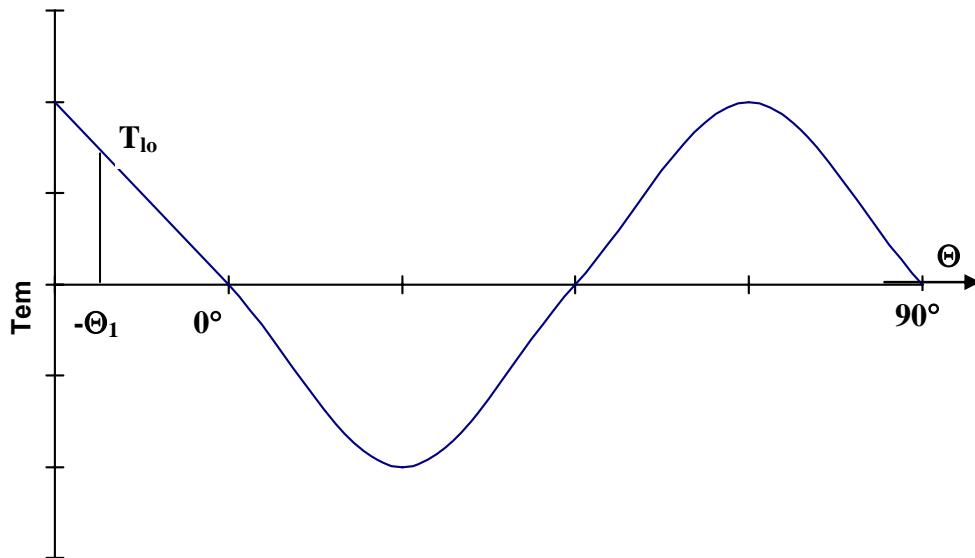
Dla małych odchyłeń Θ moment napędowy T_{em} wyprowadzony z warunków energetycznych

$$T_{em} = \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL}{d\Theta}$$

gdzie indukcyjność uzwojenia fazy L zależy od kąta i jest proporcjonalna do kwadratu liczby zwojów i odwrotnie proporcjonalna do reluktancji $R(\Theta)$, zależny jest od położenia katowego. Moment napędowy zależy od i_A , a nie zależy od kierunku przepływu prądu. Na rysunku (Rys.2.) przedstawiono moment w funkcji kąta Θ przy stałym prądzie i_A .



Rys.1 Zasada działania silnika skokowego reluktancyjnego.



Rys.2. Zależność momentu od odchylenia.

gdzie T_{lo} – moment obciążenia,

Θ_1 – kąt odchylenia od położenia równowagi.

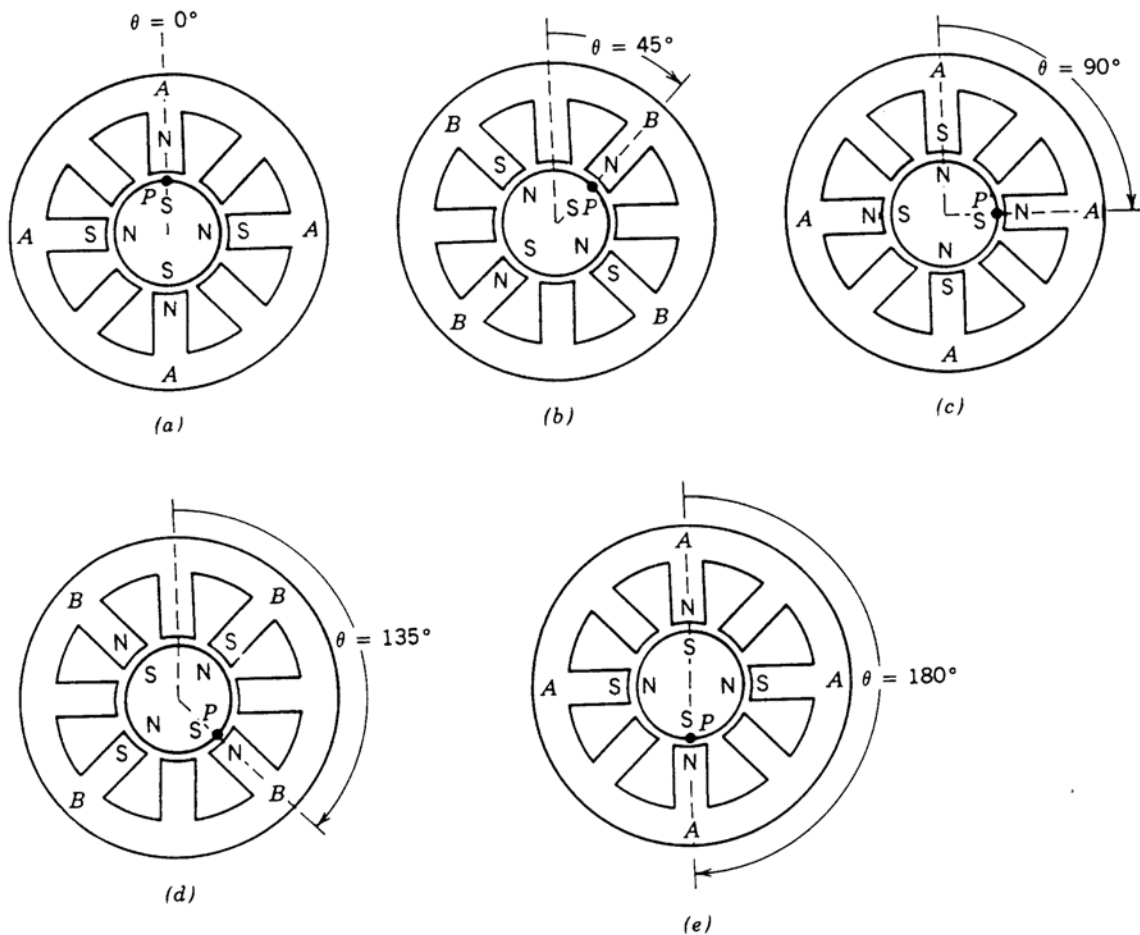
Zmieniając sterowanie z fazy **A** na fazę **B** wirnik (nieobciążony) przyjmuje pozycję jak na Rys.1.b. Wirnik przemieszcza się o elementarny skok kątowy. Przy obciążeniu stałym momentem wirnik przemieszcza się o taki sam skok. Rys.1.c i d pokazują następne położenia w fazach **C** i **D**. Dla pełnej sekwencji sterowań **A-B-C-A** wirnik dokonuje trzech przemieszczeń. Łączny kąt przemieszczenia jest równy kątowi pomiędzy nabiegunnikami wirnika i wynosi $360^\circ/N_r$. Przy trzech fazach wzbudzenia daje to $(360^\circ/N_r) \cdot 1/3 = 30^\circ$. Ogólnie dla wzbudzenia q – fazowego podstawowy krok kątowy wynosi:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{qN_r}$$

Kierunek obrotu zależny jest od sekwencji sterowań, a kierunek przeciwny obrotów wymaga sekwencji **A-C-B-A**. Silniki reluktancyjne o bardziej złożonej budowie działają na tej samej zasadzie.

Silnik skokowy magnetoelektryczny (z magnesami trwałymi)

Na rysunku (Rys.3) pokazano zasadę działania silnika skokowego z magnesami trwałymi zbudowanego z wirnika o czterech stałych biegunach magnetycznych i stojana zbudowanego z dwóch uzwojeń na czterech nabiegunnikach. W uzwojeniach prąd płynie w obu kierunkach (i_{A+} , i_{A-} , i_{B+} , i_{B-}).



Rys.3. Zasada działania silnika skokowego magnetoelektrycznego.

Bieguny magnetyczne powstające w stojanie przy odpowiednim wystawieniu uzwojeń oddziałują na bieguny wirnika powodując moment obrotowy T_{em} wirnika. Moment jest proporcjonalny do prądu sterowania i proporcjonalny do małej odchyłki θ od położenia równowagi.

Kierunek ruchu określa kolejność sterowań:

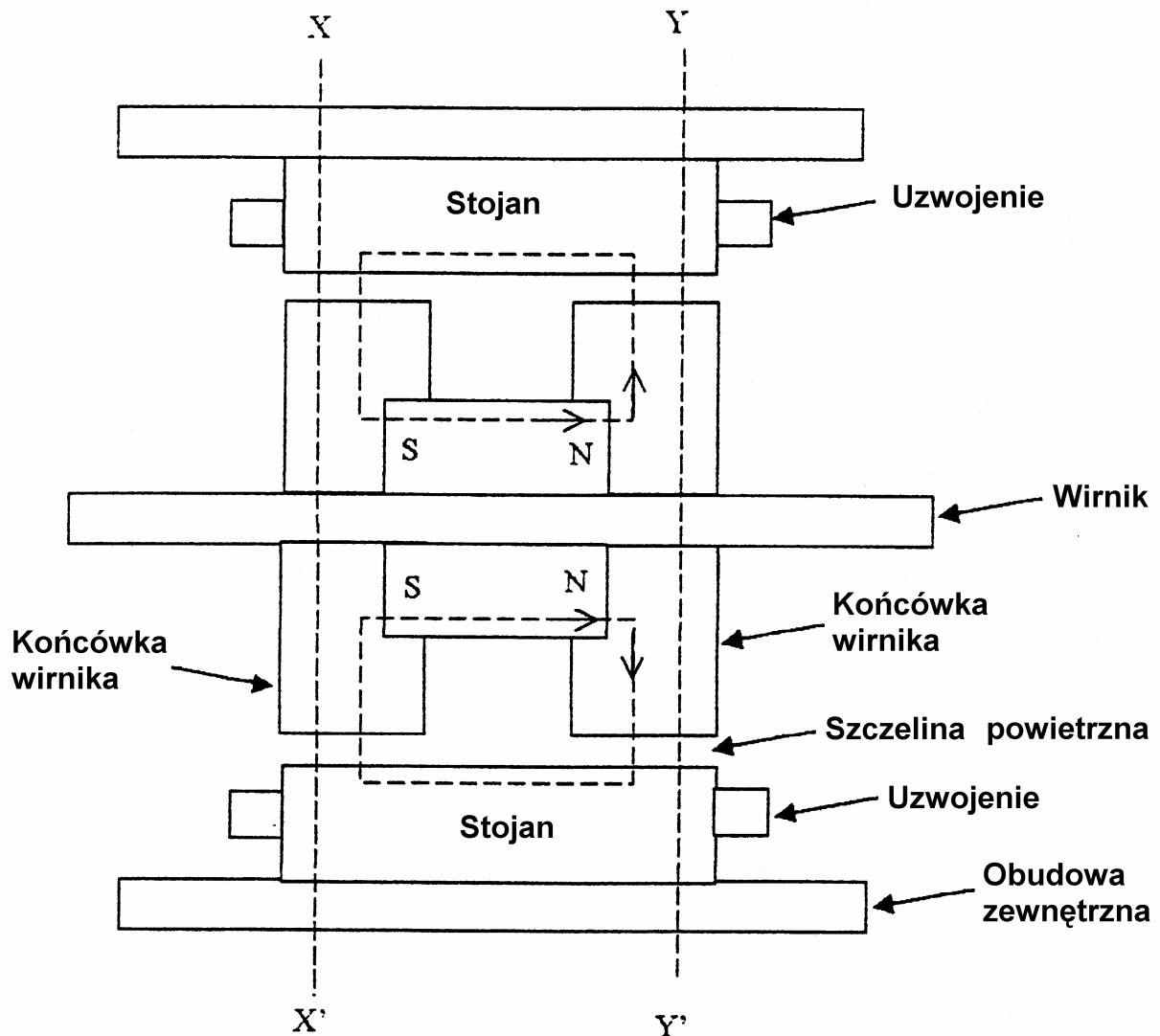
$i_{A+}; i_{B+}; i_{A-}; i_{B-}; i_{A+};$ itd. – kierunek jak na rysunku,

$i_{A+}; i_{B-}; i_{A-}; i_{B+}; i_{A+};$ itd. – kierunek przeciwny.

Silniki krokowe z magnesem trwałym mają dużą bezwładność w stosunku do osiąganych momentów. Uzyskanie małych kroków jest kłopotliwe technologicznie. Zaletą tego typu silników jest istnienie momentu podtrzymującego położenie przy zaniku sterowania.

Silniki skokowe hybrydowe

Silniki skokowe hybrydowe łączą w sobie zasadę działania silników skokowych z magnesami trwałymi i silników skokowych reluktancyjnych. Na rysunku Rys.4 przedstawiono widok silnika hybrydowego w przekroju podłużnym.



Rys.4. Budowa silnika hybrydowego – przekrój podłużny.

Wirnik zbudowany jest z magnesu stałego magnesującego wirnik równolegle do osi tworząc dwa bieguny. Końcówki wirnika uformowane są w postaci nabiegunków o równej liczbie zębów Nr. W przekroju X - X' wirnik ma biegun S, w przekroju Y – Y' wirnik ma biegun N.

Dla silnika z prezentowanego przykładu stojan składa się z dwóch uzwojeń fazowych, z których każde wytwarza cztery bieguny. Wzbudzenie z uzwojeń stojana wytwarza strumień

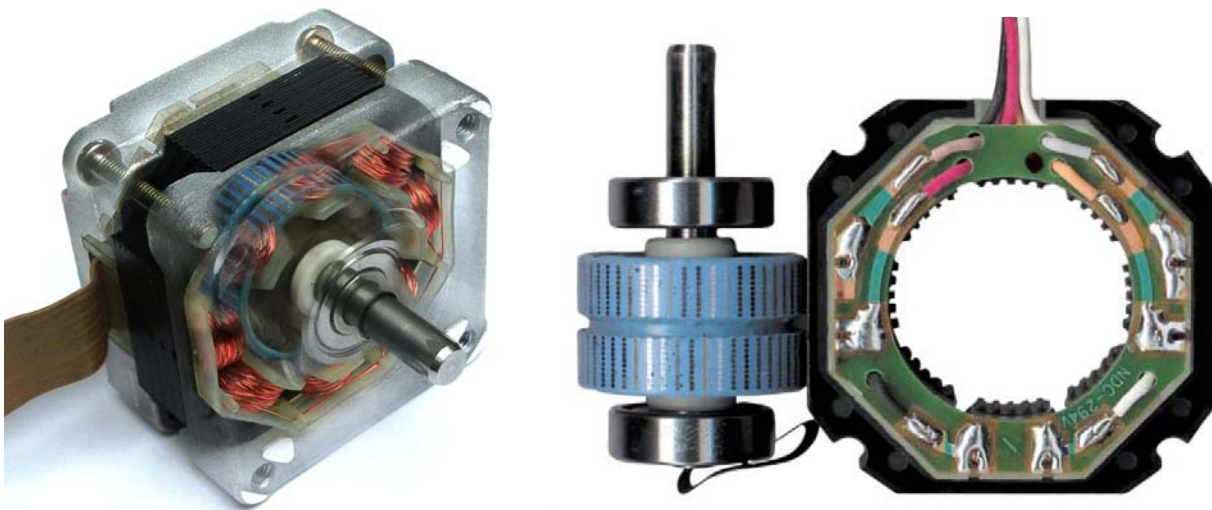
Po wysterowaniu uzwojeń powstaje moment wynikający ze zmiennej reluktancji i układ wirnik – stojan dąży do osiągnięcia pozycji kątowej, przy której strumień dla danej fazy jest największy. Zmieniając fazy i kierunek prądów uzyskujemy przemieszczenie wirnika. Podstawowy krok kątowy ma wartość $\frac{1}{4}$ kąta pomiędzy zębami wirnika. Zmieniając cztery razy prądy w uzwojeniach wg sekwencji i_{A+} , i_{B+} , i_{A-} , i_{B-} powodujemy obrót o jeden ząb wirnika ($4 * \frac{1}{4}$).

Dla silnika hybrydowego o dwóch fazach sterowania krok podstawowy zależy od liczby nabiegunników wirnika.

$$\Theta_{\min} = \left(\frac{360^\circ}{N_r} \right) \frac{1}{4} \quad \text{co przy } N_r = 10 \text{ daje } 9^\circ$$

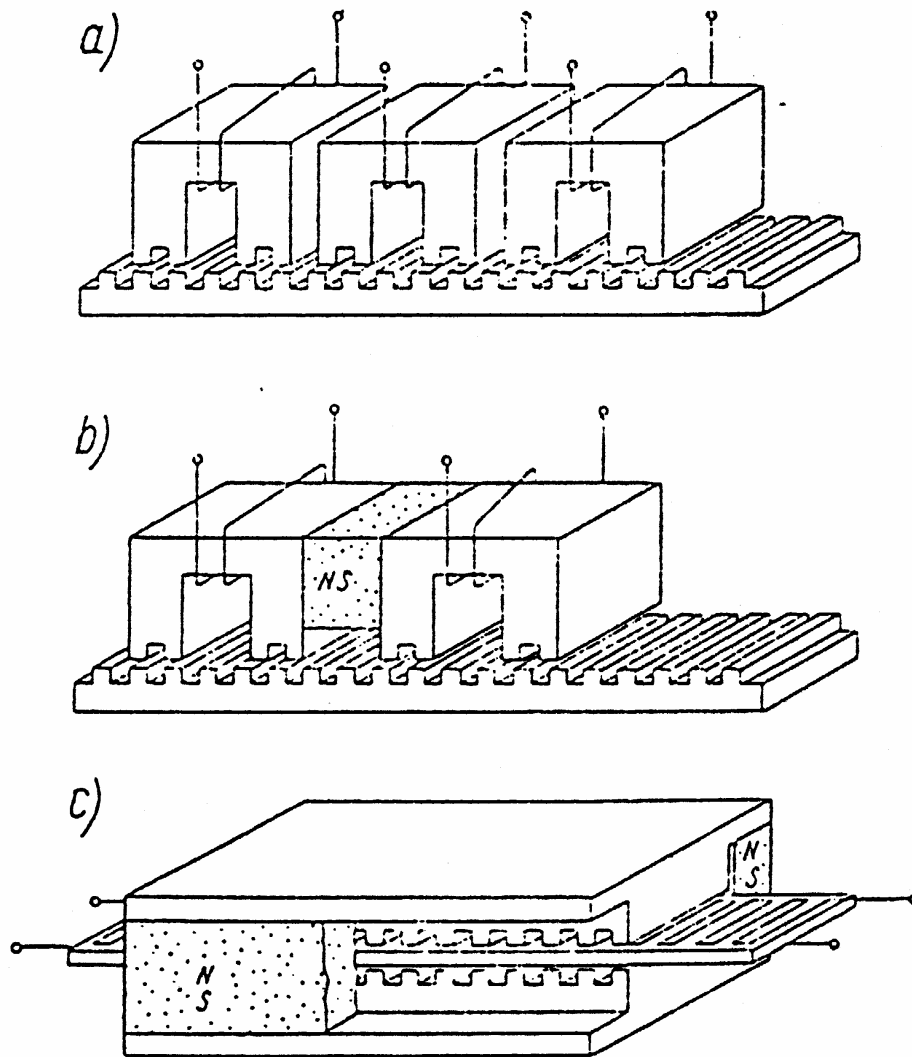
Moment w silniku hybrydowym wytwarzany jest przez oddziaływanie strumienia magnetycznego z magnesów trwałych (stały) i wytwarzany w cewkach stojana (zależny od prądu). Moment T_{em} jest proporcjonalny do prądu w uzwojeniach. Typowe silniki hybrydowe mają kąt kroku $1,8^\circ$ (200 kroków/obróć).

Na fotografii (fot.1.) pokazano widok typowego silnika hybrydowego



Silniki skokowe liniowe

Analogicznie jak silniki skokowe obrotowe, tak i silniki liniowe posiadają trzy odmiany: reluktancyjne hybrydowe i elektrodynamiczne pokazane na rys.6.

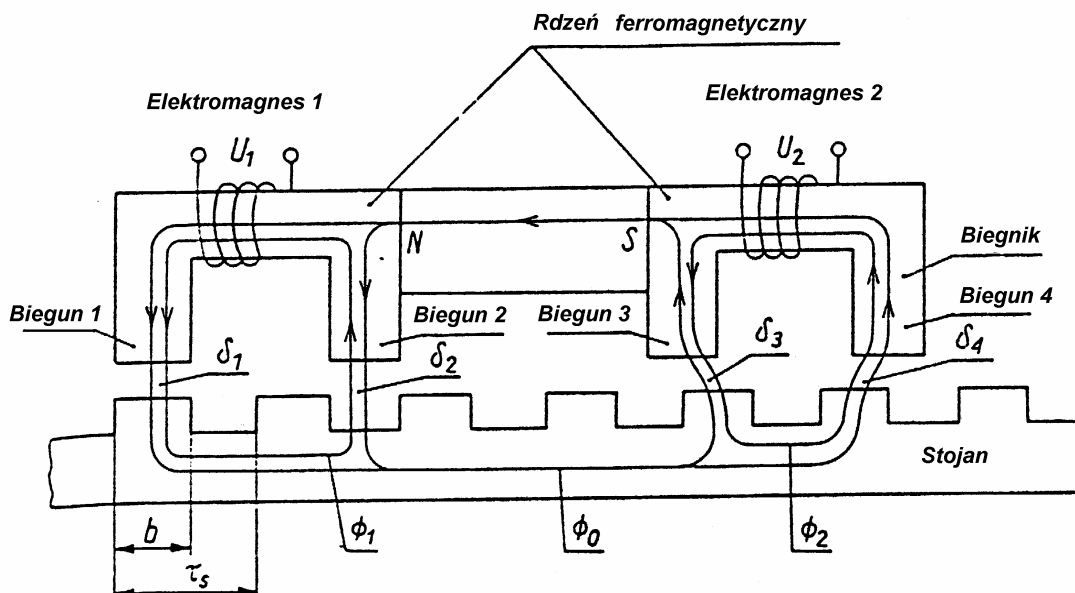


Rys.6. Liniowe silniki skokowe

a) reluktancyjny; b) hybrydowy; c) elektrodynamiczny

Silnik reluktancyjny (Rys.6.a) jest odpowiednikiem pod względem zasady działania silnika skokowego wirującego. Składa się z rdzenia stojana i wirującego biegnika wykonanego z blachy elektrotechnicznej.

Silnik hybrydowy pokazany na Rys.6.b składa się z części nieruchomej stojana i części ruchomej (biegnika). Część nieruchoma to uzębiona ferromagnetyczna płyta. Biegnik składa się z dwu rdzeni ferromagnetycznych pomiędzy którymi znajduje się magnes trwały. Nabiegunki każdego elektromagnesu są przesunięte o szerokość żłobka, jak pokazano na Rys.7.



Rys.7. Liniowy hybrydowy silnik skokowy

Rdzenie biegnika są rozmieszczone względem siebie z przesunięciem o połowę szerokości zębka.

Silnik wytwarza siłę w skutek przemiany energii pola magnetycznego w szczelinie powietrznej wzdłuż wykonanego skoku. Siła wynosi

$$F = -\frac{dW_m}{dx_m} = -\Phi^2 \frac{dR_m}{dx_m}$$

$\frac{dR_m}{dx_m}$ – zmiana reluktancji (oporu magnetycznego) wzdłuż drogi strumienia magnetycznego

Magnes trwały wytwarza strumień magnetyczny Φ_0 . Elektromagnes 1 (Rys.7) zasilany jest takim prądem, aby wytworzony strumień wynosił $\Phi_1 = \Phi_0 / 2$. Strumienie magnetyczne pod biegunem 1 się dodają, a pod biegunem 2 odejmują, redukując do zera. Biegnik utrzymywany jest w tym położeniu, gdyż energia pola magnetycznego jest minimalna.

Chcąc wykonać skok $\Delta x_m = b_z / 2$ w lewo, należy wyłączyć elektromagnes 1, a włączyć elektromagnes 2. Strumienie magnetyczne w biegunie 3 redukują się do zera, a w biegunie 4 dodają się. Biegnik przesunie się o $b_z / 2 = \tau / 4$, aby biegun 4 ustawił się naprzeciwko zęba stojana. Jeśli prąd w uzwojeniu elektromagnesu 2 będzie miał kierunek przeciwny, to biegnik przemieści się o jeden skok w prawo.

Na Rys.6.c pokazano elektrodynamiczny silnik skokowy. Pomiedzy dwoma uzębionymi biegunami wytwarzającymi pole magnetyczne, porusza się biegnik posiadający po obu stronach przewody w kształcie meandrów, przesuniętych względem siebie. Przy

odpowiednim zasilaniu prądami impulsowymi pasm biegnika, przesuwa się on skokowo. Silnik tego typu jest wykorzystywany do pozycjonowania elementów o małej masie, ze względu na małe siły.

Zaletą silników skokowych liniowych jest bezpośrednia zamiana impulsowych sygnałów sterujących na przemieszczenie liniowe. Mają one większą dokładność i sprawność oraz lepsze parametry dynamiczne w porównaniu z wirującymi silnikami skokowymi w połączeniu z mechanizmami przetwarzania ruchu obrotowego na postępowy.

Silniki skokowe - cechy i zastosowanie

Silniki skokowe charakteryzują się następującymi właściwościami (omówionymi dalej):

- a) przy ustalonym systemie zasilania (komutacji) wirnik (lub biegnik w silniku liniowym) zajmuje określone, stałe położenia;
- b) odległość kątowa (lub liniowa) między sąsiednimi położeniami jest stała dla danej maszyny i nazywa się skokiem;
- c) w układzie pozycjonującym (serwonapędzie) silnik może pracować bez sprzężenia zwrotnego;
- d) moment napędowy (lub siła) są we wszystkich położeniach równowagi zajmowanych przez wirnik czy biegnik równe zeru - stanowi to o warunek równowagi i spoczynku;
- e) każda próba wychylenia wirnika (lub biegnika) z pozycji równowagi powoduje powstanie momentu (siły) synchronizującego skierowanego ku niej;
- f) maksymalny moment synchronizujący nosi nazwę momentu trzymającego;
- g) moment trzymający występuje po wychyleniu do wartości jednego skoku;
- h) metodami elektronicznymi skok można podzielić na dowolną liczbę mikroskoków.

Silniki skokowe znalazły bardzo wiele różnorodnych zastosowań. Znaleźć je można wszędzie tam, gdzie wymagane jest precyzyjne pozycjonowanie kątowe lub liniowe.

Najwięcej liczbowo silników skokowych znajduje się w komputerach i urządzeniach peryferyjnych do nich (dysków twardych, czytnikach i nagrywarkach płyt CD, DVD, drukarkach, skanerach). W każdym komputerze domowym jest kilka takich silników.

Drugą grupą są urządzenia powszechnego użytku, w których znaleźć można wiele różnorodnych silników skokowych, są wyroby mechanizujące prace biurowe, zapisujące i odczytujące informacje dźwiękowe oraz obrazowe, a także zegary i zegarki z regulatorem kwarcowym.

Inną grupę mającą w swej budowie silniki skokowe, stanowią nowoczesne aparaty fotograficzne, kamery wideo, rzutniki obrazów i projektory, pozycjonery anten satelitarnych, telefaksy.

W zastosowaniach przemysłowych silniki skokowe pracuje w urządzeniach technologicznych, a wśród nich w robotach, manipulatorach, pozycjonerach, drukarkach kodów, układach selekcji, w maszynach sprzedających, pakujących i wielu innych. Silniki do zastosowań technologicznych, a szerzej, profesjonalnych - często nazywa się elektromaszynowymi elementami automatyki. Muszą wyróżniać się wysoką jakością wykonania i stabilnością parametrów.