

### **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 skokowy jest to silnik przekształcający ciąg sterujących impulsów elektrycznych na ciąg przesunięć kątowych lub liniowych.

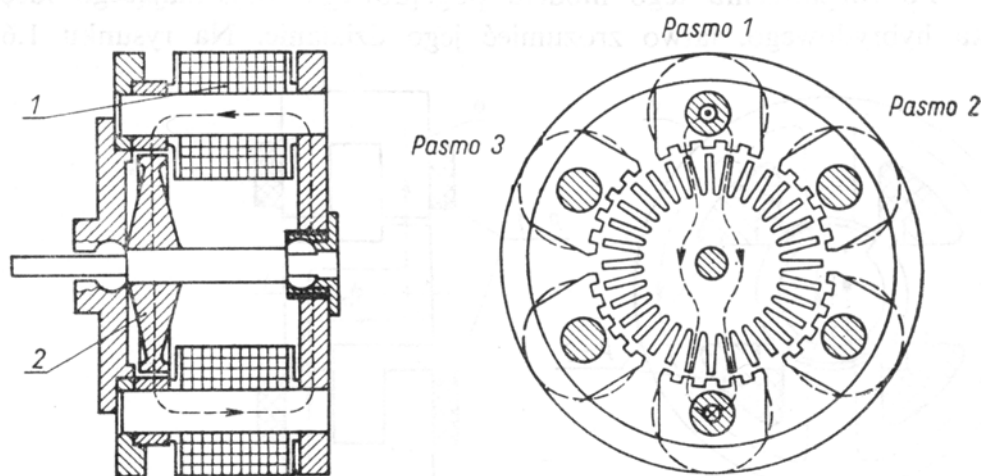
### **Silniki skokowe – rys historyczny**

Pierwsze opisy urządzeń elektrotechnicznych, które możemy interpretować jako protoplastów silników skokowych pojawiły się w 1831 roku. Salvatore del Negro opisał mechanizm skokowy o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Do generacji sekwencji impulsów stosowano komutatory elektromechaniczne.

Zbliżona do współczesnych konstrukcja silnika skokowego pojawiła się i została opatentowana przez C. L. Walkera w Aberdeen w Wielkiej Brytanii w 1919 roku.

Pokazany na rys 1. silnik skokowy był silnikiem reluktancyjnym.

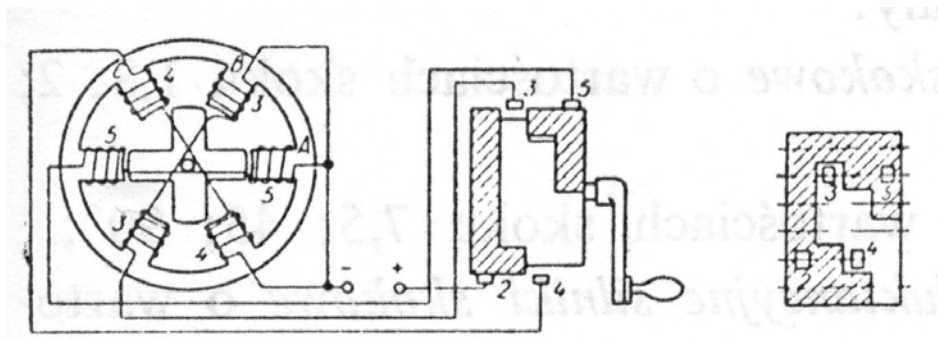
Walker podał też pomysł silnika skokowego liniowego. Takie konstrukcje pojawiły się dopiero w latach pięćdziesiątych XX wieku.



Rys. 1. Silnik reluktancyjny Walkera.

Silniki skokowe pierwotnie znalazły zastosowanie militarne. W marynarce brytyjskiej np. do zdalnego sterowania wskaźnikiem kierunku wyrzutu torped i kierunku dział okrętowych.

Przez długi czas do pojawienia się tranzystorów do generowania sekwencji impulsów sterujących stosowano komutatory elektromechaniczne zbliżone do pokazanego na rys.2.



Rys.2. Komutator elektromechaniczny do silników skokowych.

### **Silniki skokowe w układach napędowych.**

W układach napędowych stosuje się trzy rodzaje silników skokowych:

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

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 umożliwiającą 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.3) 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

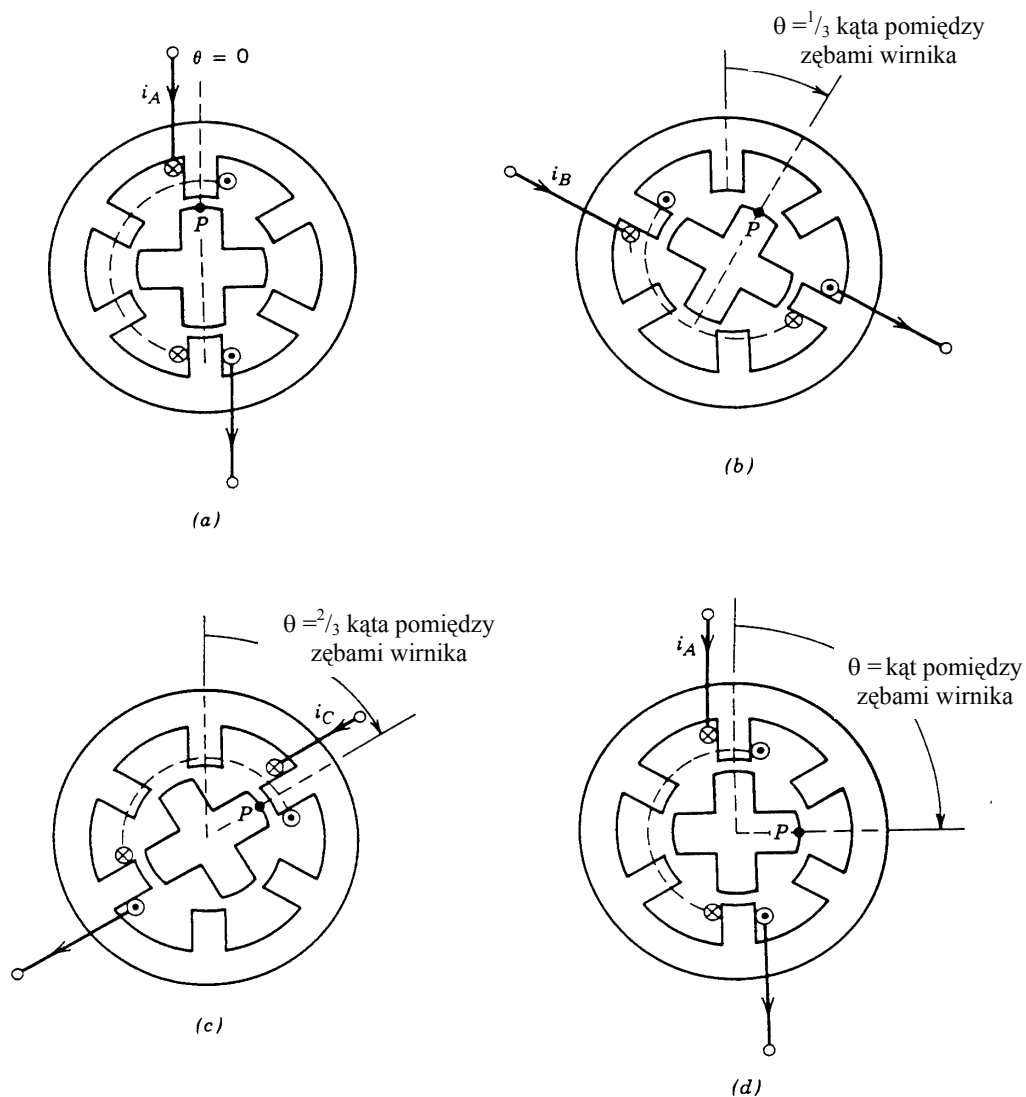
$N_r = N_s \pm (N_s/q)$ . Czyli elementarny skok to  $\theta = 1/3$  kąta pomiędzy zębami wirnika

W fazie A (Rys.3.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  $\Theta = 0$ .

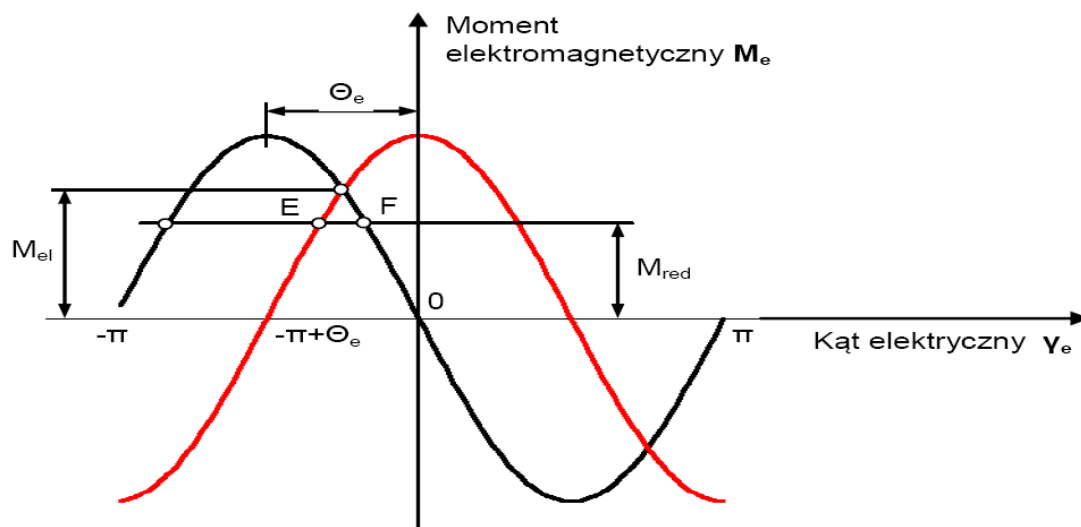
Dla małych odchyłeń  $\Theta$  moment napędowy  $T_{em}$  wyprowadzony z warunków energetycznych

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

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.



Rys.3 Zasada działania silnika skokowego reluktancyjnego.



Rys.4. Warunek wykonania skoku przez obciążony silnik przy podaniu zasilania na kolejne pasmo.  
gdzie  $M_{red}$  – moment obciążenia,

$\Theta_e$  – wysterowanie kolejnej cewki [90°].

Zmieniając sterowanie z fazy **A** na fazę **B** wirnik (nieobciążony) przyjmuje pozycję jak na Rys3..b . Wirnik przemieszcza się o elementarny skok kątowy. Przy obciążeniu stałym momentem wirnik przemieszcza się o taki sam skok. Rys..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  $(360^\circ/N_r)*1/3 = 30^\circ$ . Ogólnie dla wzbudzenia  $q$  – fazowego podstawowy krok kątowy wynosi:

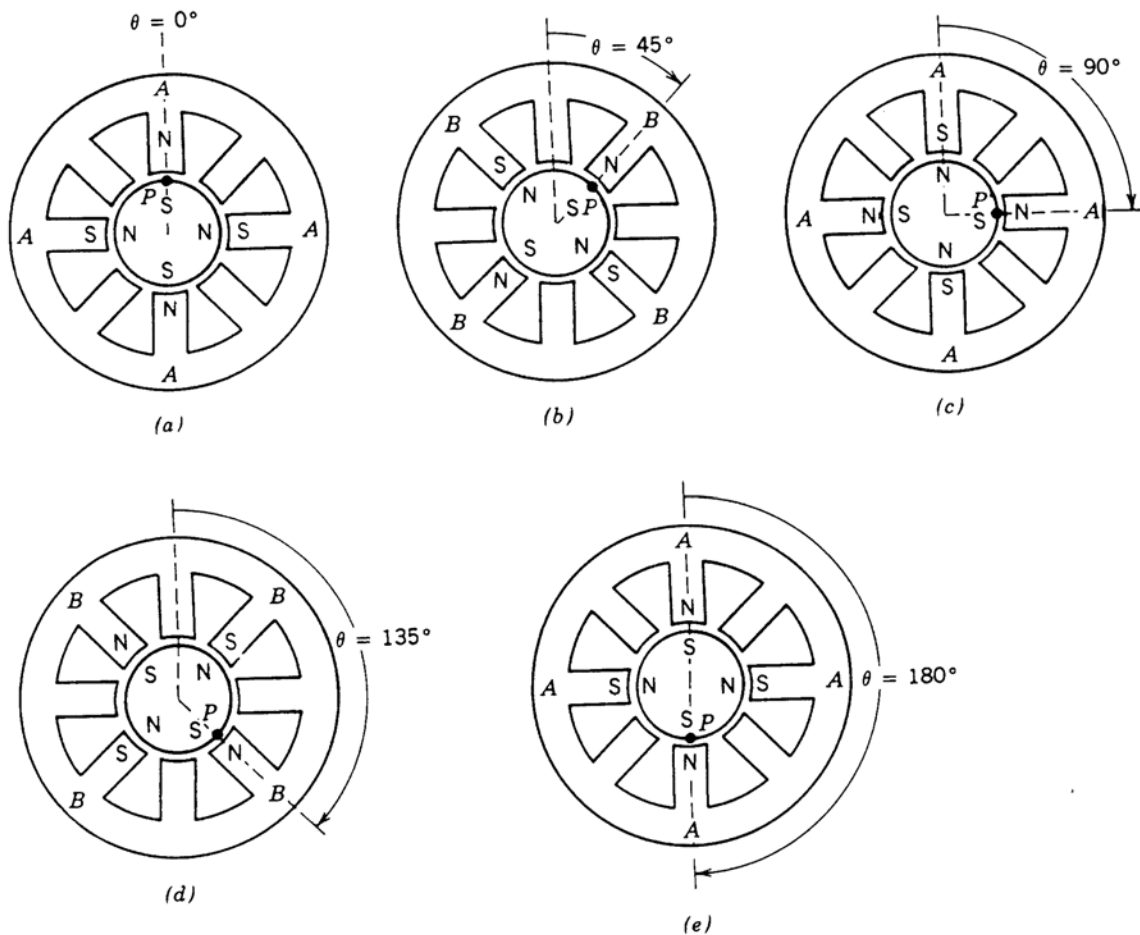
$$\alpha = \frac{360^\circ}{qN_r}$$

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.

Na rys. 4. pokazano warunek wykonania skoku przez obciążony mechanicznie silnik przy podaniu zasilania na kolejne pasmo. Kąt elektryczny oznacza kąt w cykliczności zmian zasilania pasm.

### ***Silnik skokowy magnetoelektryczny (z magnesami trwałymi)***

Na rysunku (Rys.5) 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.5. Zasada działania silnika skokowego magnetoelektrycznego.

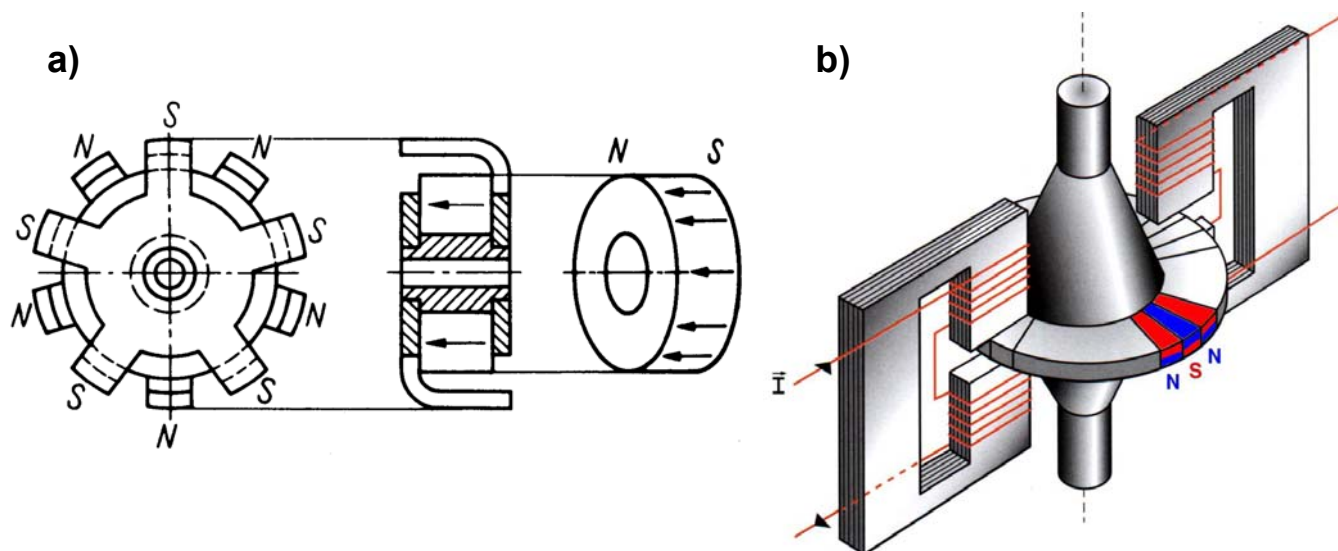
Bieguny magnetyczne powstające w stojanie przy odpowiednim wystawieniu uzwojeń oddziałują na bieguny wirnika powodując moment obrotowy  $T_{em}$  wirnika. Moment jest proporcjonalny do prądu sterowania i proporcjonalny do małej odchyłki  $\theta$  od położenia równowagi.

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.

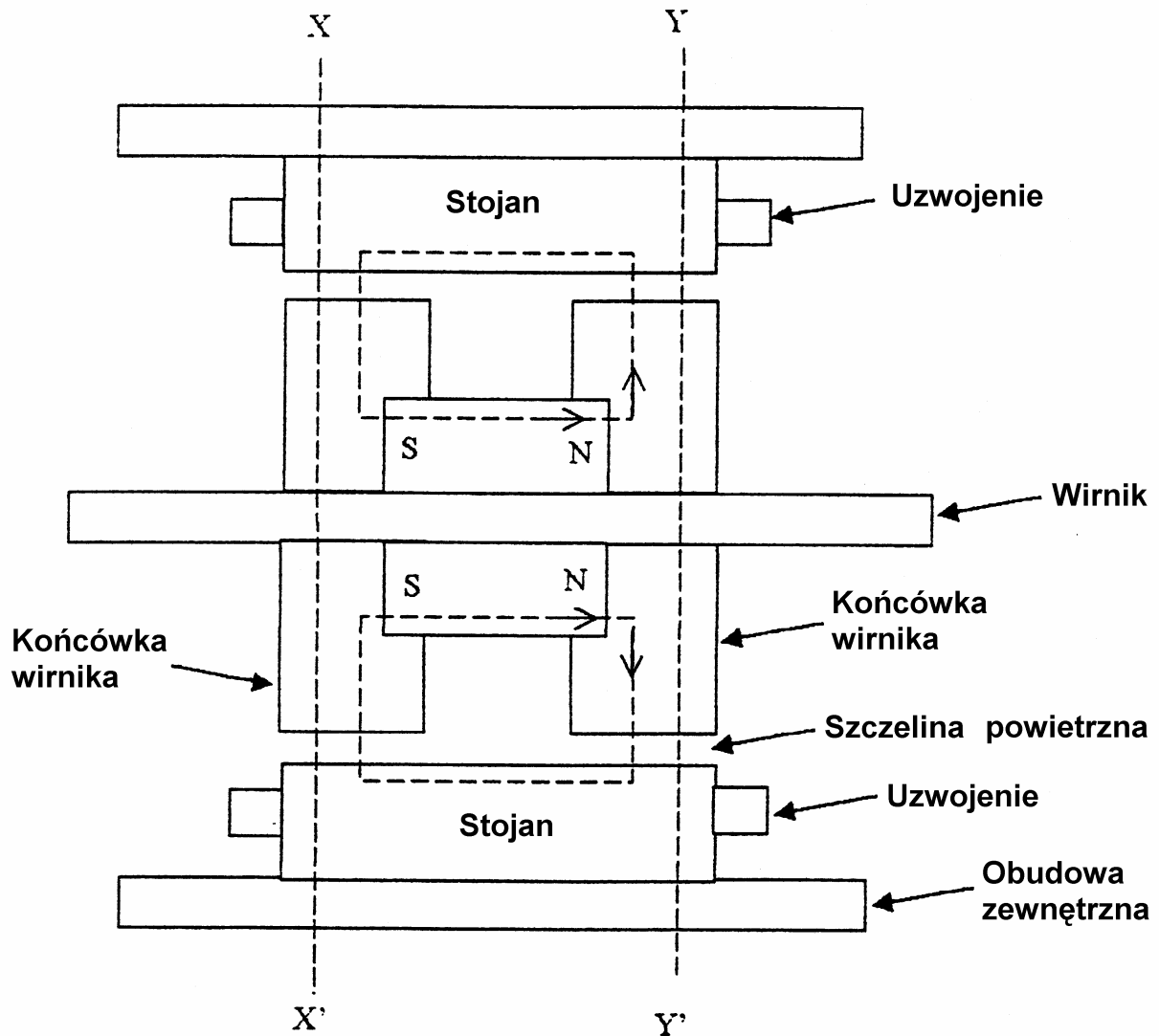
Silniki krokowe z magnesem trwałym mają dużą bezwładność w stosunku do osiąganych momentów. Uzyskanie małych kroków jest kłopotliwe technologicznie. Zaletą tego typu silników jest istnienie momentu podtrzymującego położenie przy zaniku sterowania.



Rys. 6. Przykład silników z wirnikiem czynnym (z magnesami trwałymi),  
a) pazurowy, b) tarczowy

### **Silniki skokowe hybrydowe**

Silniki skokowe hybrydowe łączą w sobie zasadę działania silników skokowych z magnesami trwałymi i silników skokowych reluktancyjnych. Na rysunku Rys.7 przedstawiono widok silnika hybrydowego w przekroju podłużnym.

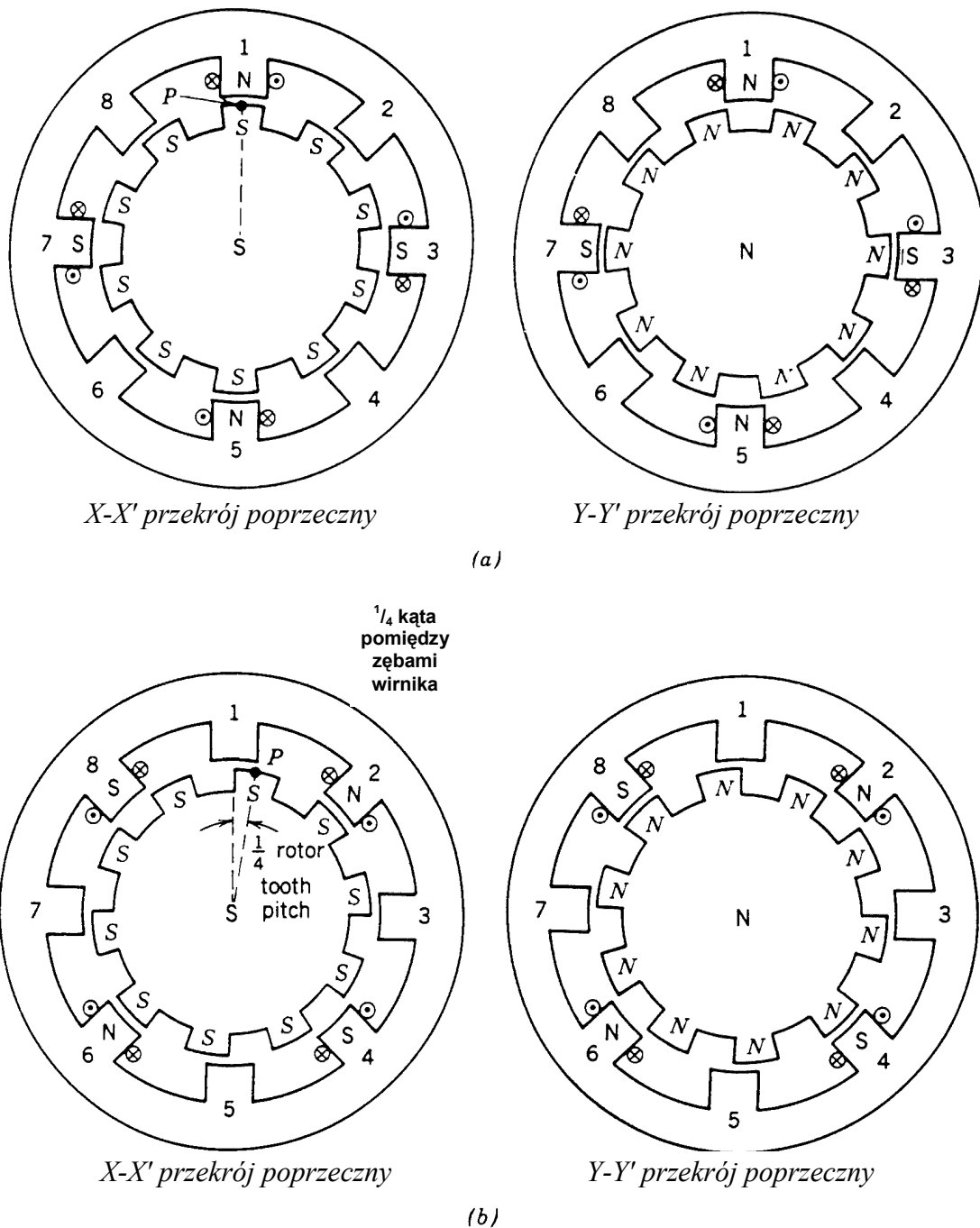


Rys.7. Budowa silnika hybrydowego – przekrój podłużny.

Wirnik zbudowany jest z magnesu stałego magnesującego wirnik równolegle do osi tworząc dwa bieguny. Końcówki wirnika uformowane są w postaci nabiegunników o równej liczbie zębów  $N_r$ . 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 magnetyczny w szczelinach pomiędzy wirnikiem a stojanem. W przykładzie końcówki wirnika posiadają 10 zębów nabiegunników  $N_r = 10$ .





Rys.7. Zasada działania silnika hybrydowego.

(a) faza A wzbudzone  $i_{A+}$ , (b) faza B wzbudzone  $i_{B+}$

Tarcze nabiegunków wirnika przesunięte są o pół zęba. Bieguny stojana 1, 3, 5, 7 są magnesowane przez fazę A, natomiast bieguny 2, 4, 6, 8 przez fazę B uzwojenia. Prąd w każdym uzwojeniu fazowym płynie w obu kierunkach.

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

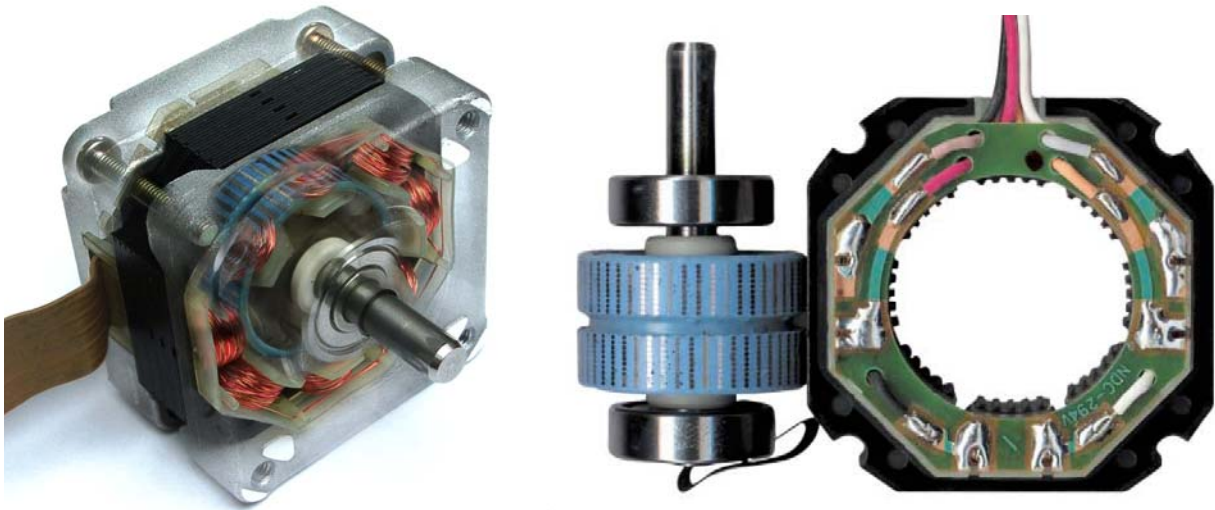
wirnika. Podstawowy krok kątowy ma wartość  $\frac{1}{4}$  kąta pomiędzy zębami wirnika. Zmieniając cztery razy prądy w uzwojeniach wg sekwencji  $i_{A+}$ ,  $i_{B+}$ ,  $i_{A-}$ ,  $i_{B-}$  powodujemy obrót o jeden ząb wirnika ( $4 * \frac{1}{4}$ ).

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

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

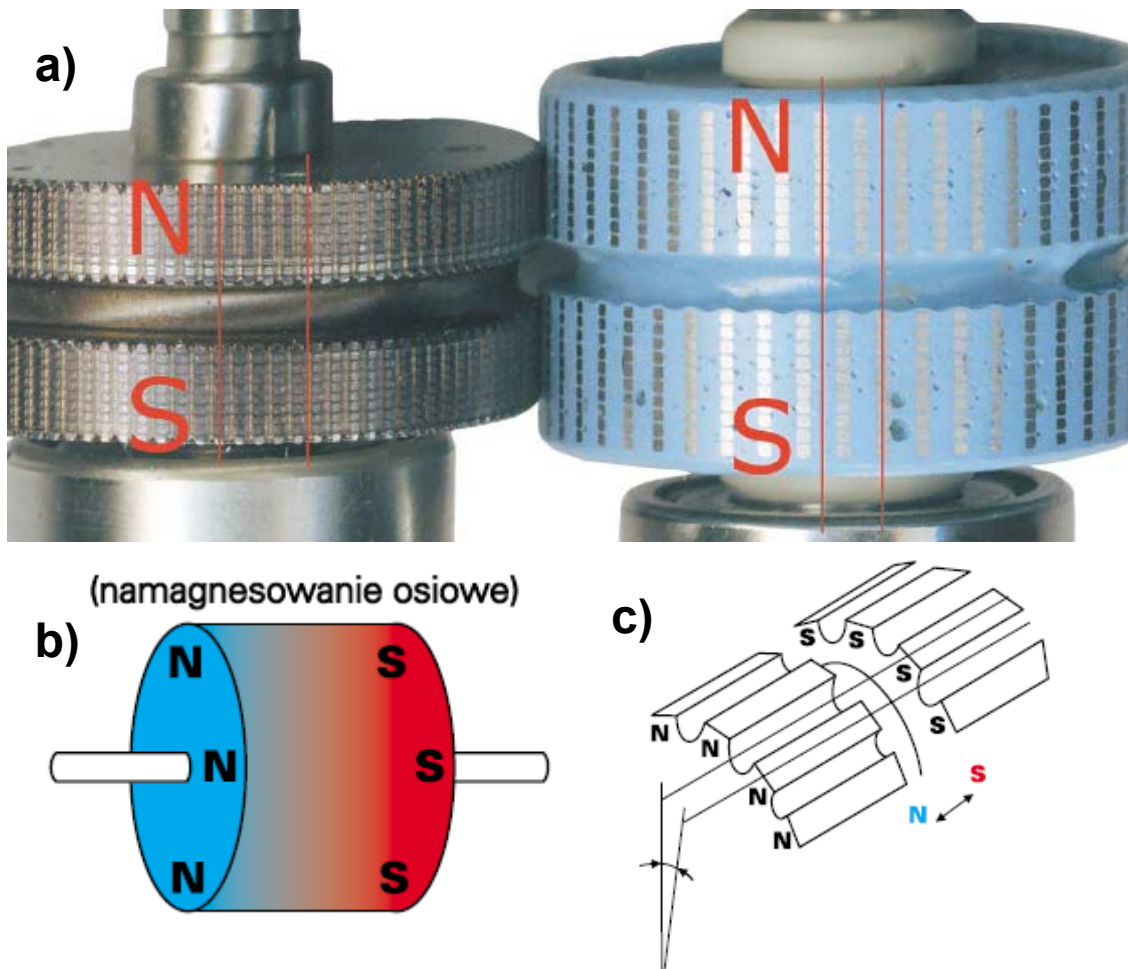
Moment w silniku hybrydowym wytwarzany jest przez oddziaływanie strumienia magnetycznego z magnesów trwałych (stały) i wytwarzany w cewkach stojana (zależny od prądu). Moment  $T_{em}$  jest proporcjonalny do prądu w uzwojeniach. Typowe silniki hybrydowe mają kąt kroku  $1,8^\circ$  (200 kroków/obróć).

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



Fot.1. Widok typowego silnika hybrydowego.

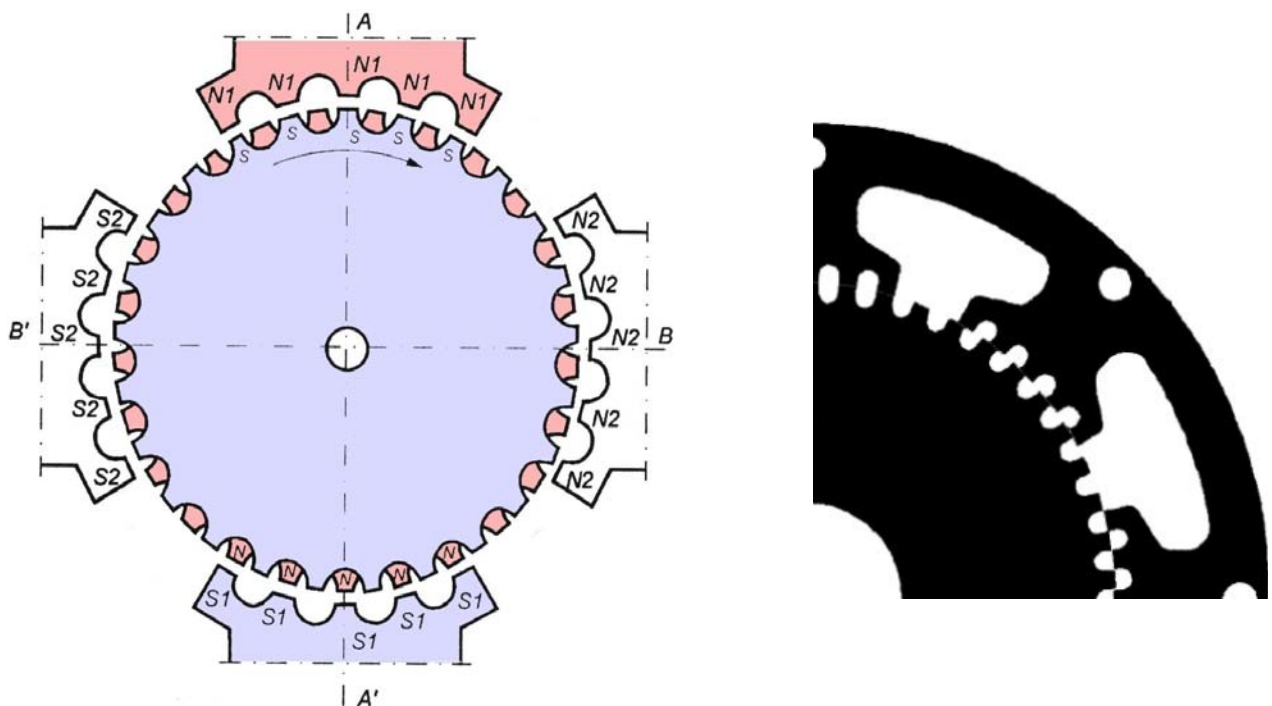
W rzeczywistym silniku hybrydowym, wirnik namagnesowany jest osiowo, co pokazano na rys. 7.a. Żłobki na wirniku są gęste (rys.7b.) i ich ilość determinuje skok elementarny silnika. By silnik działał zębki na tarczy wirnika namagnesowane N muszą być przesunięte o pół odległości między ząbkami w stosunku do tarczy namagnesowanej S (rys.7.c.).



Rys.8. Budowa wirnika silnika skokowego hybrydowego.

Budowę wirnika silnika dwupasmowego hybrydowego pokazano na rys.8.a..

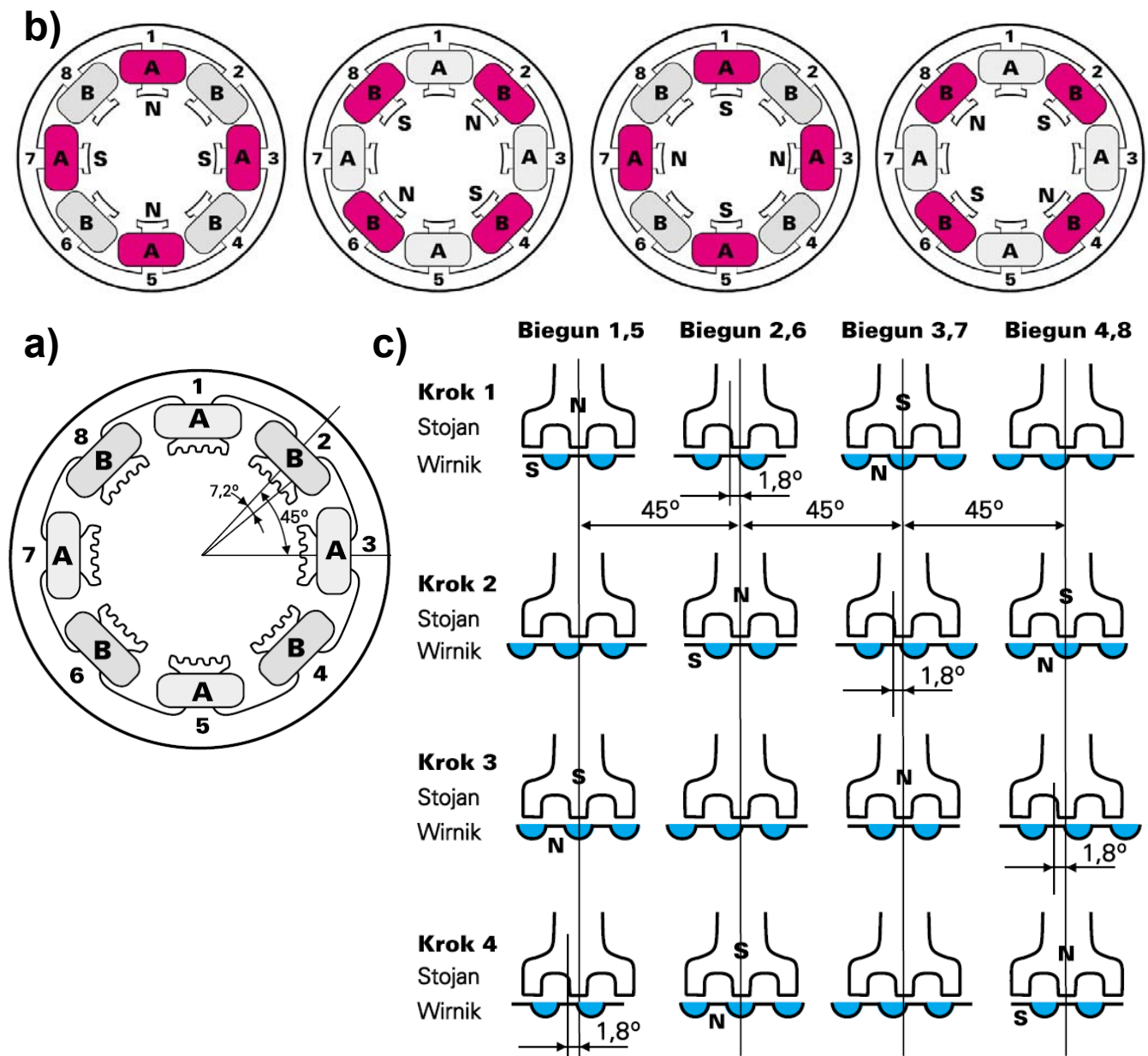
A na rys 9. pokazano budowę stojana silnika skokowego hybrydowego.



Rys. 9. Budowa stojana silnika hybrydowego.

Sekwencje zasilania uzwojeń silnika i odpowiadający temu układ biegunów magnetycznych pokazano na rys.10.b..

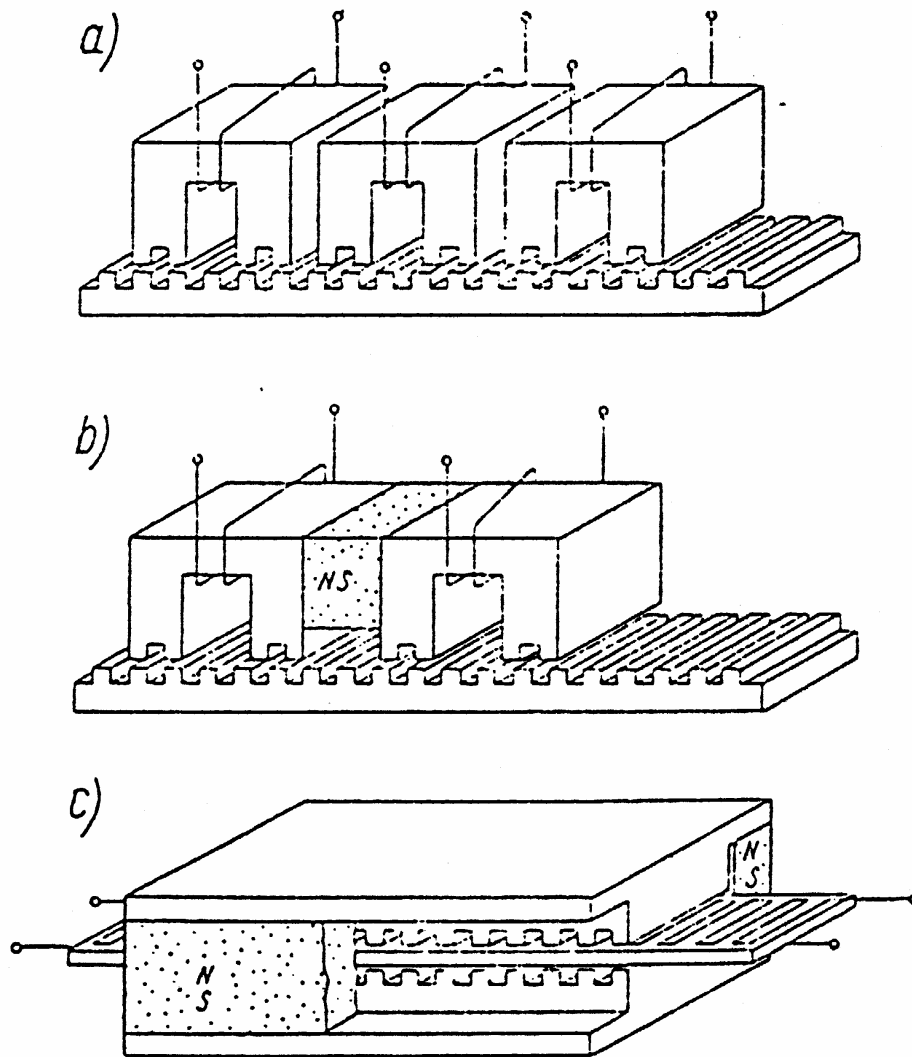
Odpowiadające temu przemieszczanie się wirnika pokazano na rys.10.c.



Rys 10. Sekwencja zasilania uzwojeń i ruchu wirnika silnika hybrydowego.

### **Silniki skokowe liniowe**

Analogicznie jak silniki skokowe obrotowe, tak i silniki liniowe posiadają trzy odmiany: reluktancyjne hybrydowe i elektrodynamiczne pokazane na rys.11.

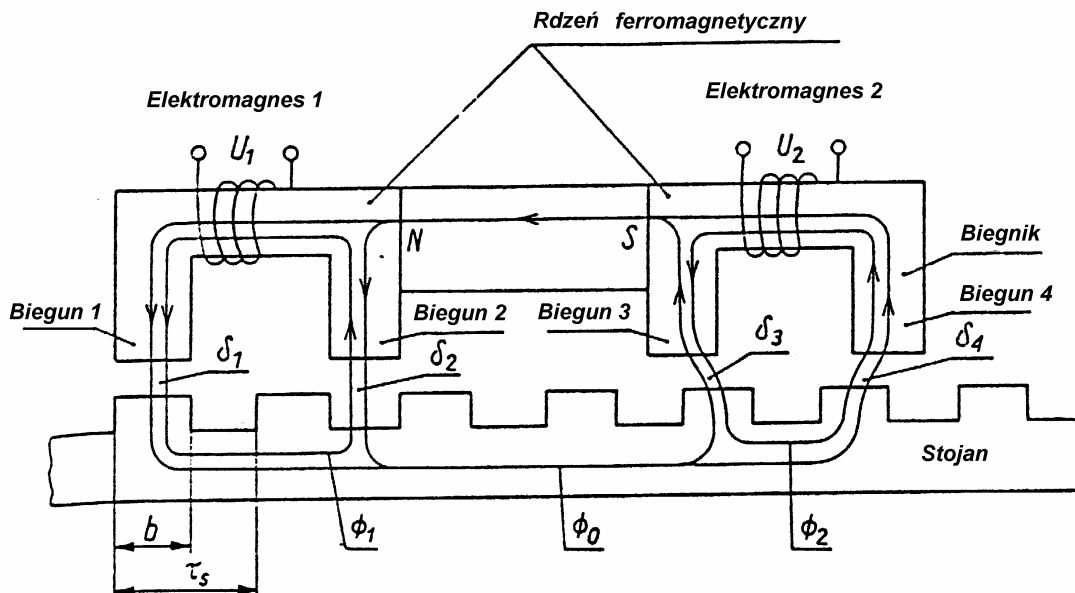


Rys.11. Liniowe silniki skokowe

a) reluktancyjny; b) hybrydowy; c) elektrodynamiczny

Silnik reluktancyjny (Rys.11.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.11.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. Nabiegunniki każdego elektromagnesu są przesunięte o szerokość żłobka, jak pokazano na Rys.12.



Rys.12. 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  $\Phi_0$ . Elektromagnes 1 (Rys.12) 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. Biegunik 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. Biegunik 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 biegunik przemieści się o jeden skok w prawo.

Na Rys.11.c pokazano elektrodynamiczny silnik skokowy. Pomiedzy dwoma uzębionymi biegunami wytwarzającymi pole magnetyczne, porusza się biegunik 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 bieżnik 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 bieżnik równe zeru - stanowi to o warunek równowagi i spoczynku;
- e) każda próba wychylenia wirnika (lub bieżnika) 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.

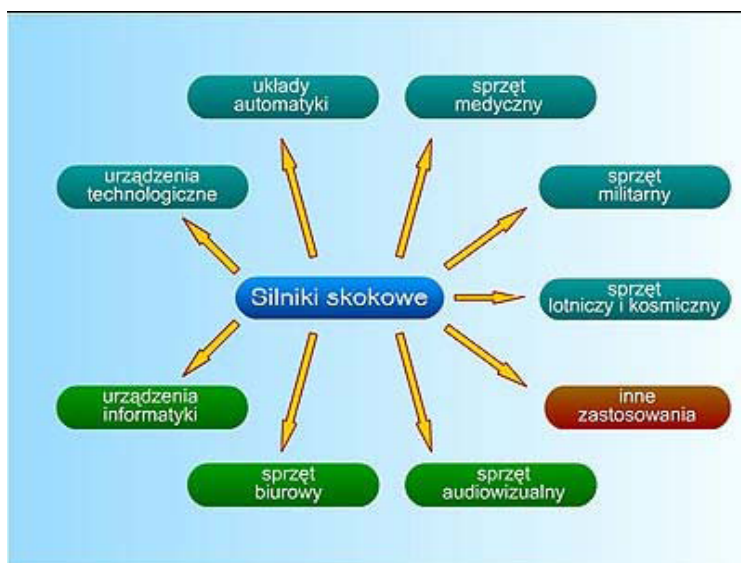
Najwięcej liczbowo silników skokowych znajduje się w komputerach i urządzeniach peryferyjnych do nich (dysków twardych, czytnikach i nagrywarkach płyt CD, DVD, drukarkach, skanerach). W każdym komputerze domowym jest kilka takich silników.

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.



Rys.13. Obszary zastosowań silników skokowych.

### **Silniki skokowe - zalety i wady**

Na zastosowanie w napędzie silnika skokowego wpływa porównanie jego zalet i wad z innymi rodzajami silników.

#### **Zalety:**

- kąt obrotu silnika jest proporcjonalny do ilości impulsów wejściowych,
- silnik pracuje z pełnym momentem w stanie spoczynku (o ile uzwojenia są zasilane)
- precyzyjne pozycjonowanie i powtarzalność ruchu - dobre silniki skokowe mają dokładność ok. 3 - 5% kroku i błąd ten nie kumuluje się z kroku na krok,
- możliwość bardzo szybkiego rozbiegu, hamowania i zmiany kierunku,
- niezawodne - ze względu na brak szczotek żywotność silnika zależy tylko od jakości łożysk,



- zależność kąta obrotu silnika od dyskretnych impulsów umożliwia sterowanie w pętli otwartej, przez co silnik skokowy jest łatwiejszy i tańszy w sterowaniu,
- możliwość osiągnięcia bardzo niskich prędkości synchronicznych obrotów z obciążeniem umocowanym bezpośrednio na osi,
- szeroki zakres prędkości obrotowych uzyskiwany dzięki temu, że prędkość jest proporcjonalna do częstotliwości impulsów wejściowych,

**Wady:**

- rezonanse mechaniczne pojawiające się przy niewłaściwym sterowaniu,
- trudności przy pracy z bardzo dużymi prędkościami.