

Sposoby sterowania pasm silników skokowych

Układy sterowania silników skokowych dzielimy ze względu na kierunek przepływu prądu w uzwojeniu pasma na:

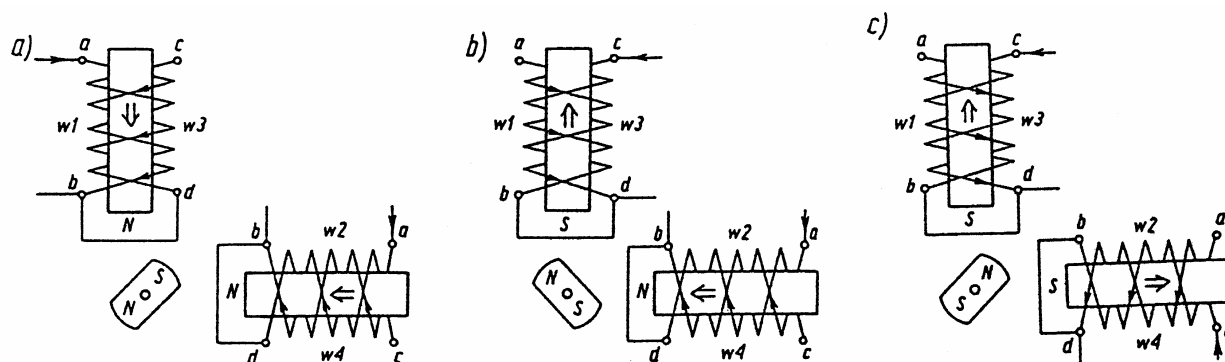
- sterowniki o impulsach jednokierunkowych (unipolarne),
- sterowniki o impulsach dwukierunkowych (bipolarne).

Sterowniki o impulsach jednokierunkowych.

Przeznaczone są do silników reluktancyjnych, gdzie kierunek przepływającego prądu nie ma wpływu na wytwarzany moment. W silnikach magnetoelektrycznych i hybrydowych sterowanie unipolarne stosowane jest w celu uproszczenia układów mocy (zmniejszenie liczby tranzystorów o połowę). Jak pokazano na rys.1. stosuje się możliwość zmiany zwrotu strumienia wytwarzanego przez pasmo bez zmiany kierunku prądu płynącego w uzwojeniach. Przy sterowaniu jednokierunkowym część (połowa) uzwojeń jest wyłączona. W wyniku tego nie wykorzystuje się pełnych możliwości pracy silnika

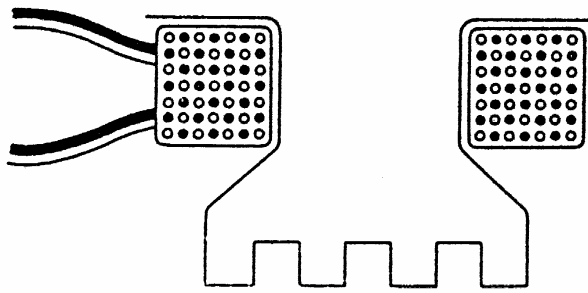
Pytanie: Przeanalizuj to z punktu widzenia wydzielanego ciepła w uzwojeniach.

Dla umożliwienia pracy jednokierunkowej uzwojenia silnika wykonane są przez nawinięcie podwójne składające się z dwóch uzwojeń nawiniętych obok siebie, jednego nawiniętego lewoskrętnie, a drugiego prawoskrętnie. Działanie silnika o tym typie nawinięcia pokazano w uproszczony sposób na rys.1.



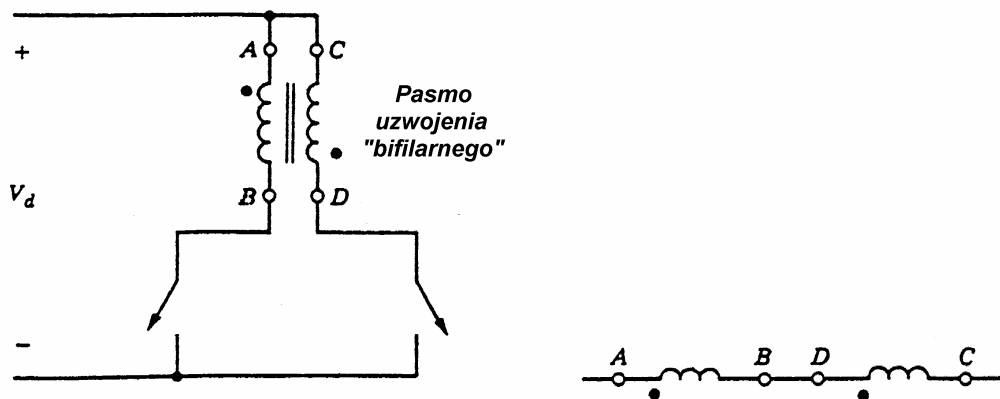
Rys.1. Działanie silnika skokowego sterowanego unipolarnie z zastosowaniem cewek o dwóch przeciwnych kierunkach nawinięcia uzwojenia.

Najczęściej uzwojenia wykonuje się przez równoczesne nawijanie dwoma przewodami. Tego typu uzwojenie nazywane jest przez analogię trochę niesłusznie "bifilarnym" (rys.2).



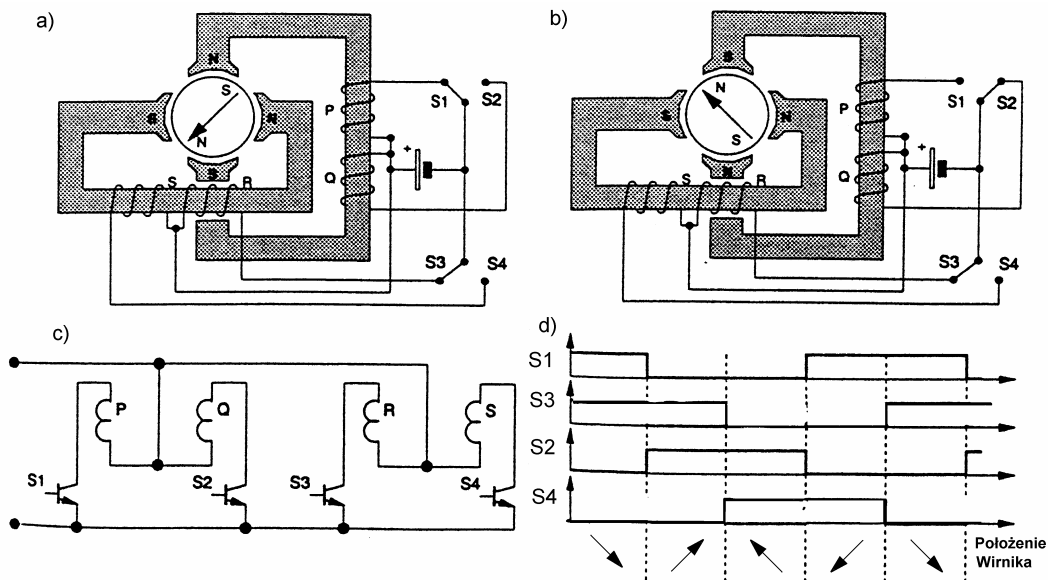
Rys.2. Sposób rozmieszczenia uzwojenia podwójnego ("bifilarnego") na biegunie silnika skokowego.

Sposób sterowania pojedynczego pasma pokazano na rys.3.



Rys.3. Sterowanie pojedynczego pasma silników z uzwojeniami do pracy jednokierunkowej.

Rysunek 4 ilustruje zasadę działania silnika skokowego dwupasmowego przy sterowaniu unipolarnym.



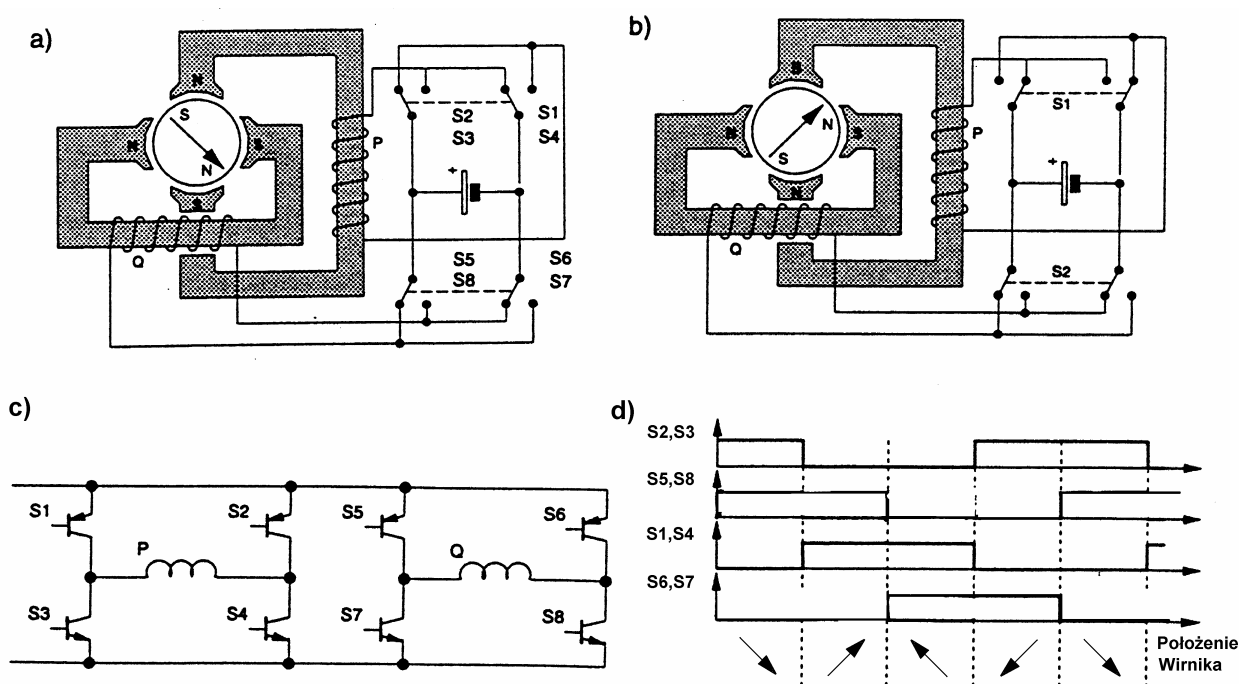
Rys.4. Unipolarne sterowanie silnika skokowego dwupasmowego.

Ze względu na przepięcia na elementach kluczących przy wyłączaniu kluczy konieczne są elementy zabezpieczające - nie pokazane na rysunkach. Zaletą sterowania unipolarnego jest umieszczenie elementów kluczących przy jednym z napięć zasilających.

Sterowniki o impulsach dwukierunkowych.

W silnikach magnetoelektrycznych i hybrydowych istotne jest obecność prądu w paśmie i jego kierunek. Zaletą układu dwukierunkowego jest dobre wykorzystanie silnika. Sterowanie impulsami dwukierunkowymi pozwala na uzyskanie o 25÷30% wyższej wartości momentów obrotowych i prawie dziesięciokrotnie wyższej wartości częstotliwości pracy synchronicznej silników.

Okupione jest to koniecznością bardziej złożonego układu sterowania z czterema tranzystorami w układzie mostkowym typu H, czyli dla silnika dwupasmowego ośmiu tranzystorów. Przy dużej integracji elementów elektronicznych, ograniczenie to nie odgrywa większej roli. Na rys.5. pokazano dwukierunkowe sterowanie silnika skokowego.



Rys.5. Sterowanie dwukierunkowe dwupasmowym silnikiem skokowym.

Praca pełnoskokowa, półskokowa i ćwierćskokowa.

Sterowanie jednokierunkowe lub dwukierunkowe zapewniane przez sterownik i odpowiednia sekwencja włączenia zasilania na pasma daje możliwość zmniejszenia wartości skoków silnika. Przez odpowiednie przełączanie zasilania uzwojeń uzyskuje się pracę:

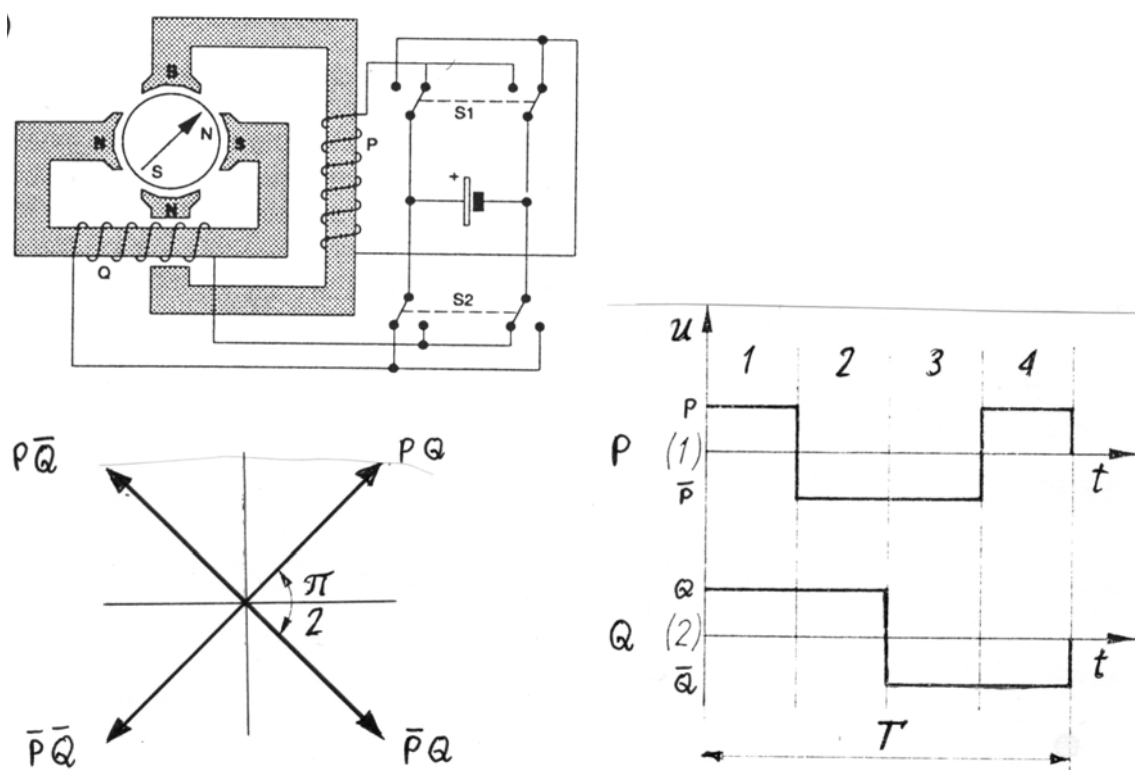
- pracę pełnoskokową (rys.6 ,7 , 8 i 9),
- pracę półskokową (rys.10, 11, 12),
- pracę ćwierćskokową (rys.13).

Odpowiednie zmiany wartości prądu zasilającego pasma w odpowiedniej wartości i sekwencji umożliwiają dalsze dzielenie skoków i uzyskanie **pracy mikroskokowej**

Praca pełnoskokowa.

Do pasm dwupasmowego (przykładowo) silnika skokowego sterowanych pełnoskokowo bipolarnie (rys.6.) przyłącza się na przemian dodatnie i ujemne impulsy prądowe. Pełny obrót wirnika składa się z czterech skoków:

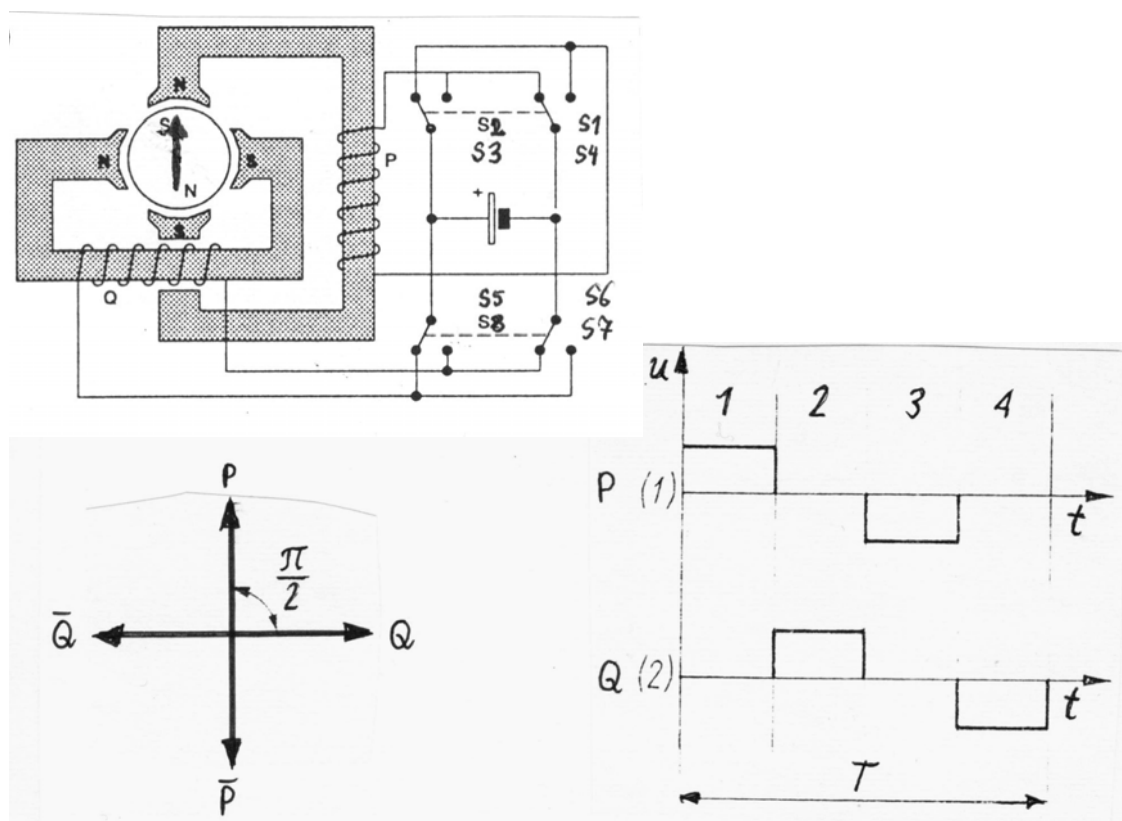
$PQ - \bar{P}Q - \bar{Q}P - PQ - itd.$



Rys.6. Wykres wektorowy i przebiegi impulsów dla sterowania bipolarnego pełnoskokowego – sterowanie dwoma pasmami.

Przy sterowaniu typu „falowego” przyłącza się sekwencyjnie napięcie tylko do jednego uzwojenia (rys.7.). Wartości skoków są identyczne jak powyżej, lecz przesunięte kątowno o połowę skoku. Wadą takiego typu sterowania jest o połowę gorsze wykorzystanie uzwojeń, niż w sterowaniu zaprezentowanym wcześniej (50% – dla sterowania bipolarnego). W rezultacie moment silnika jest mniejszy o 30%. Jedyna zaleta - oszczędność energii, okupiona jest pogorszeniem innych parametrów.

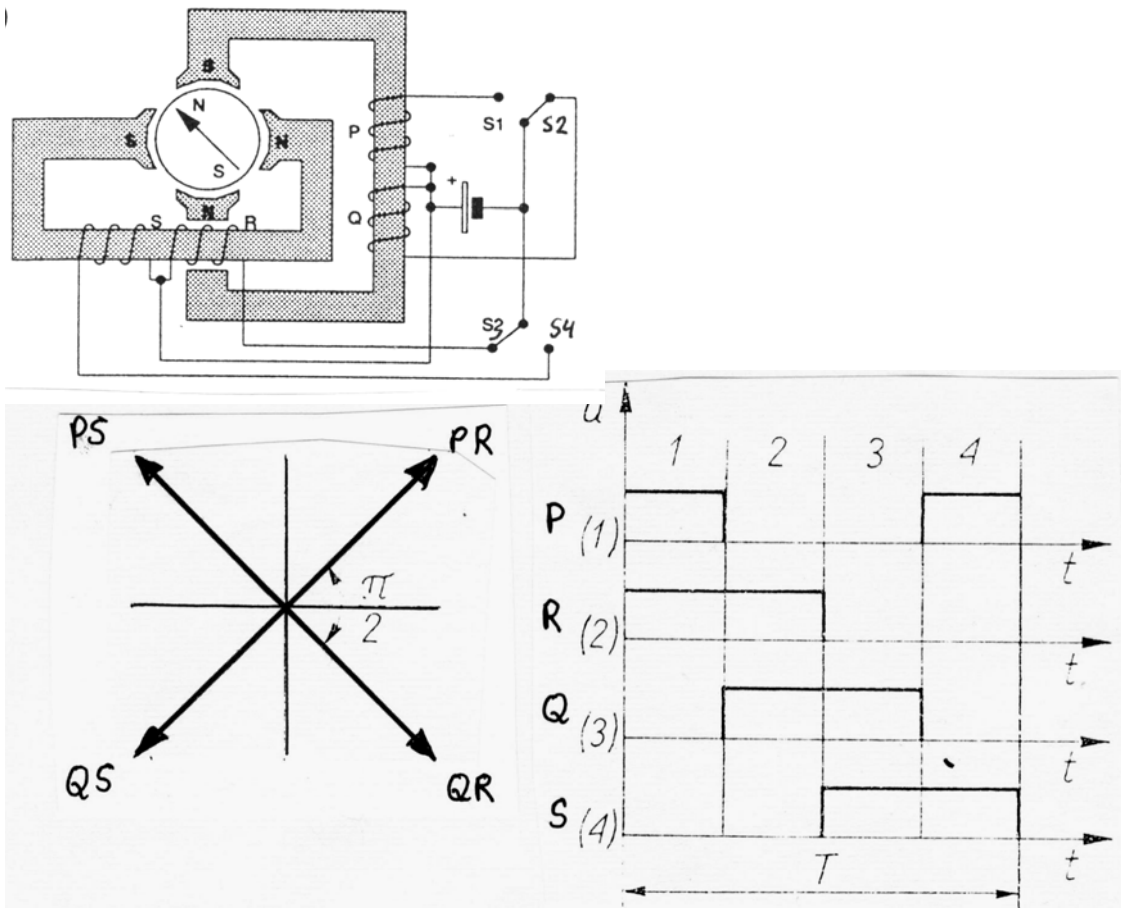
Dla silnika sterowanego bipolarnie sekwencja włączeń została pokazana na rys.7. Sekwencja włączeń dla wykonania czterech skoków wynosi: **$P - Q - \bar{P} - \bar{Q} - P - itd.$**



Rys.7. Wykres wektorowy i przebiegi impulsów dla sterowania bipolarnego pełnoskokowego – sterowanie jednym pasmem

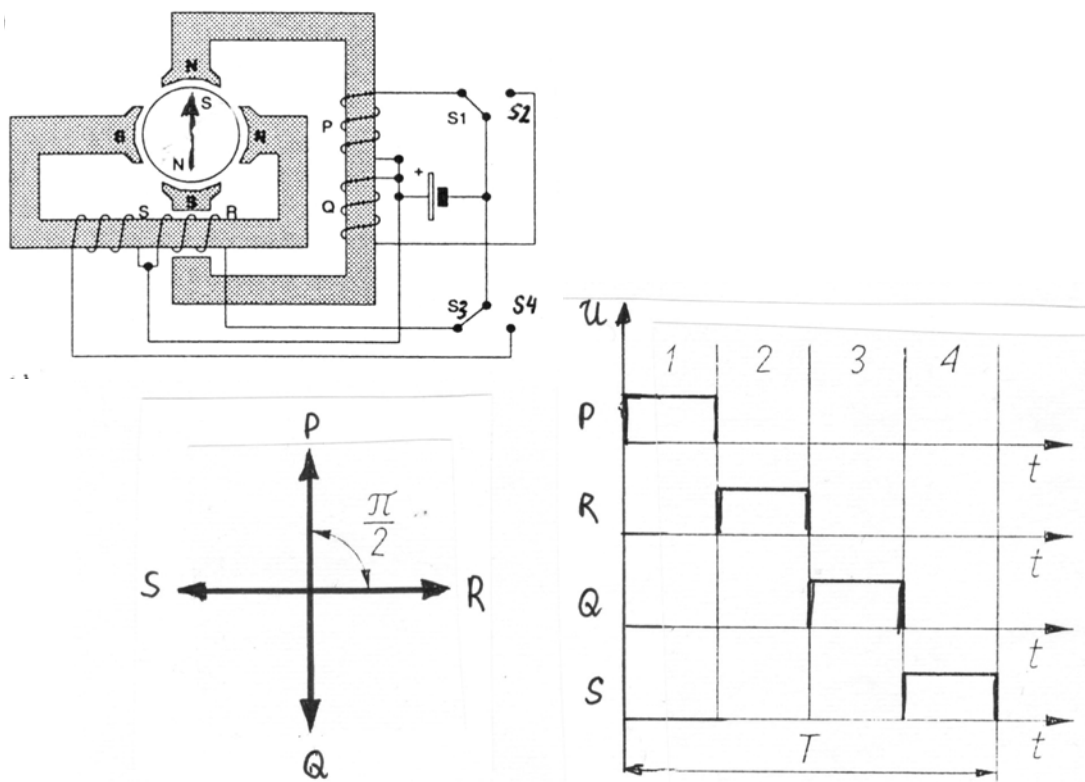
Przy stosowaniu sterowania pełnoskokowego do uzwojeń unipolarnych (rys.8.) sekwencja włączeń uzwojeń dla wykonania czterech skoków, wykorzystując oba pasma, jest następująca **$PR - QR - QS - PS - PR - itd.$** (rys. 8.).

W tym sposobie sterowania unipolarnego wykorzystuje się tylko 50% uzwojeń w każdej chwili, stąd też i uzyskiwany moment jest mniejszy.



Rys.8. Wykres wektorowy i przebiegi impulsów dla sterowania unipolarnego pełnoskokowego – sterowanie dwoma pasmami.

Sterując w silniku unipolarnie równocześnie tylko jedno uzwojenie wykorzystuje się tylko 25% uzwojeń. Sekwencja włączeń, dla wykonania czterech skoków pokazana na rys.9. ma postać: **$P - R - Q - S - P - itd.$**

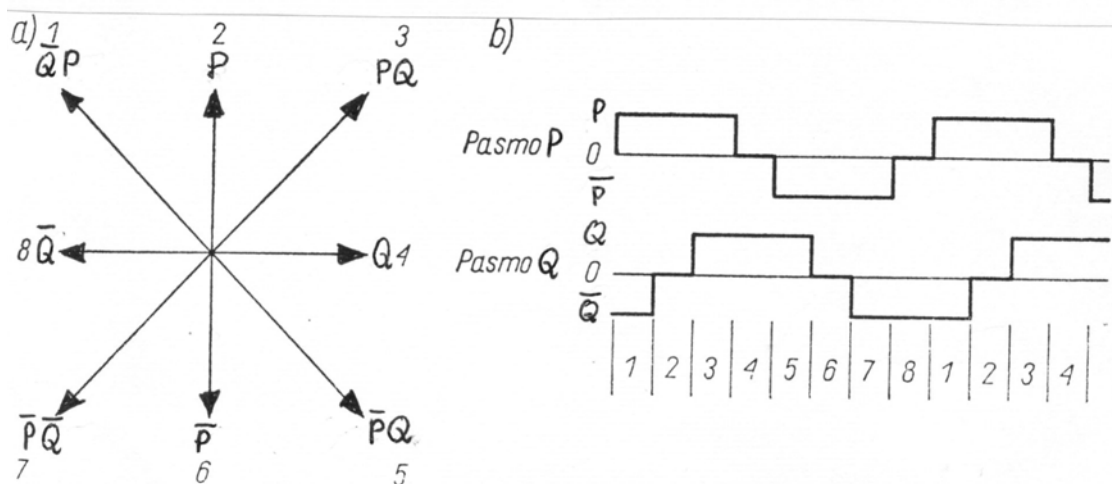


Rys.9. Wykres wektorowy i przebiegi impulsów dla sterowania unipolarnego pełnoskokowego – sterowanie jednym pasmem.

Praca półskokowa.

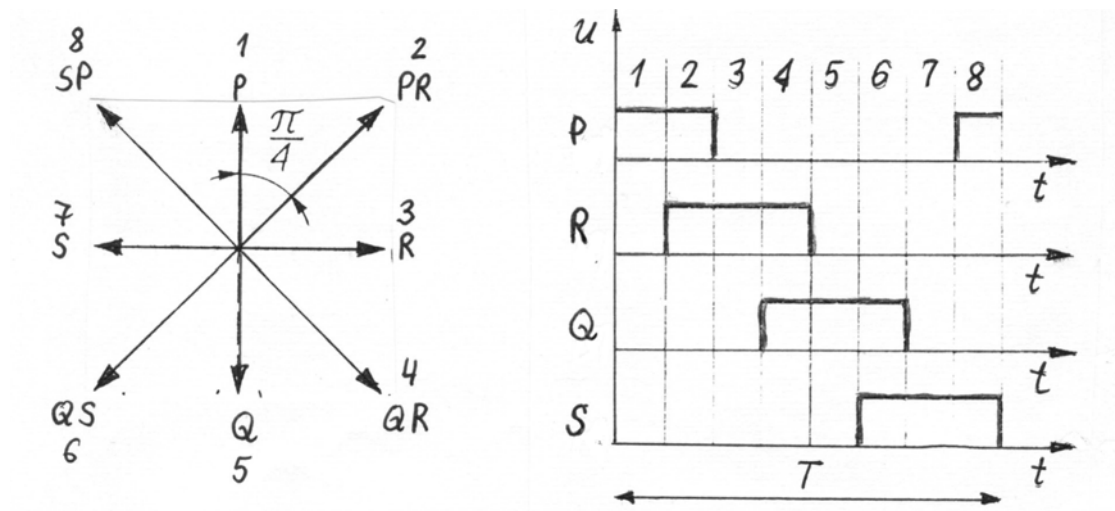
W odróżnieniu od pracy pełnoskokowej, gdzie w każdym kroku zasilania jest ta sama liczba uzwojeń, w pracy półskokowej, co drugi skok zmienia się liczba wysterowanych uzwojeń.

Dla sterowania bipolarnego na rysunku 10 pokazano sekwencję włączeń, wykres wektorowy, prądy w pasmach. Sekwencja włączeń dla wykonania ośmiu skoków silnika dwupasmowego wynosi: $P - PQ - Q - \bar{P}Q - \bar{P} - \bar{P}\bar{Q} - \bar{Q} - \bar{Q}P - P - itd.$



Rys.10. Sterowanie bipolarne półskokowe silnika skokowego dwupasmowego.

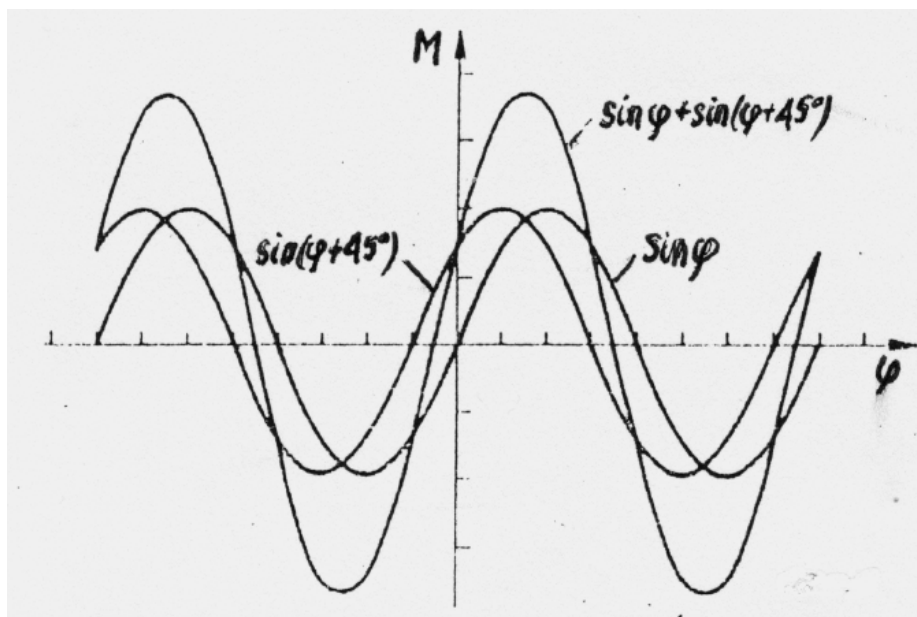
Praca półskokowa przy sterowaniu unipolarnym wymaga sekwencji włączeń pokazanej na rys.11. Sekwencja włączeń dla wykonania ośmiu skoków silnika czterouzwojeniowego wynosi: **$P - PR - R - QR - Q - QS - S - SP - P - itd.$**



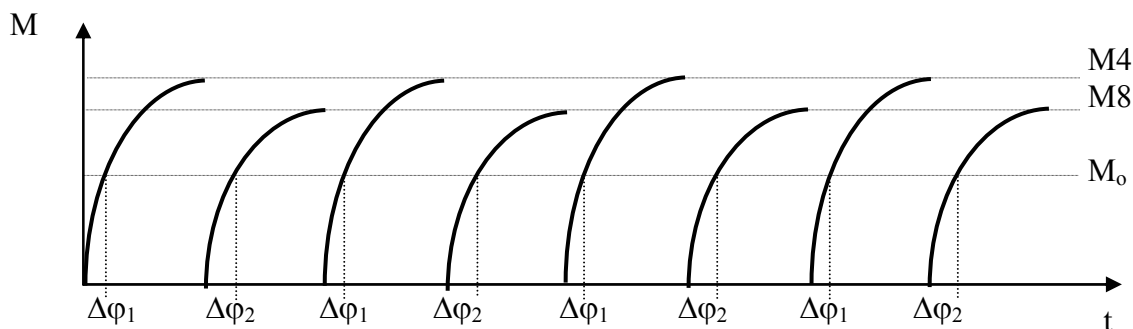
Rys.11. Sterowanie unipolarne półskokowe silnika skokowego dwupasmowego.

Zaletą sterowania połówkowego są: większa dokładność pozycjonowania i nieco większa częstotliwość pracy. Mniejsze problemy ze zjawiskami rezonansowymi w silniku, zmniejszającymi się przy wzroście liczby skoków na obrót. Wadą jest różnica momentu trzymającego i napędowego dla pozycji z dwoma pracującymi uzwojeniami (dwuuzwojeniowy – 100%) i jednym (jednuzwojeniowy – 70%).

Na rys.12 pokazano charakterystykę momentu dla sterowania w kolejnych trzech krokach sterowania półskokowego.



Rys. 12. Charakterystyki momentu silnika skokowego o skoku 45° przy kolejnych fazach sterowania półskokowego.



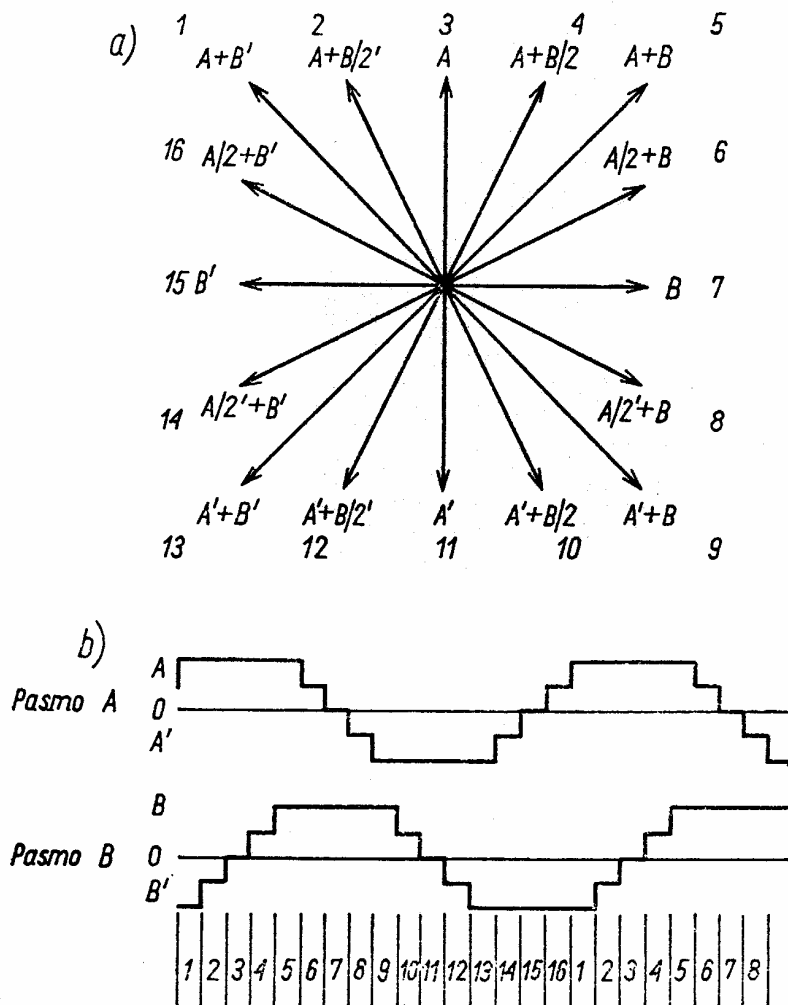
Rys.13. Błąd statyczny przy obciążeniu stałym momentem M_0 dla pracy półskokowej silnika skokowego.

Różnice momentu napędowego mogą prowadzić do wibracji, szumów mechanicznych. Są one jednak mniejsze niż drgania dla sterowania pełnoskokowego.

Wady zmienności momentu przy pracy półskokowej nie ma zmodyfikowana metoda półskokowa, polegająca na zwiększeniu momentu pozycji jednouzwojeniowej do wartości momentu pozycji dwuuzwojeniowej. Równość momentów zapewnia zwiększenie prądu uzwojenia przy pozycji jednouzwojeniowej do ok. 140% prądu nominalnego.

Praca ćwierćskokowa.

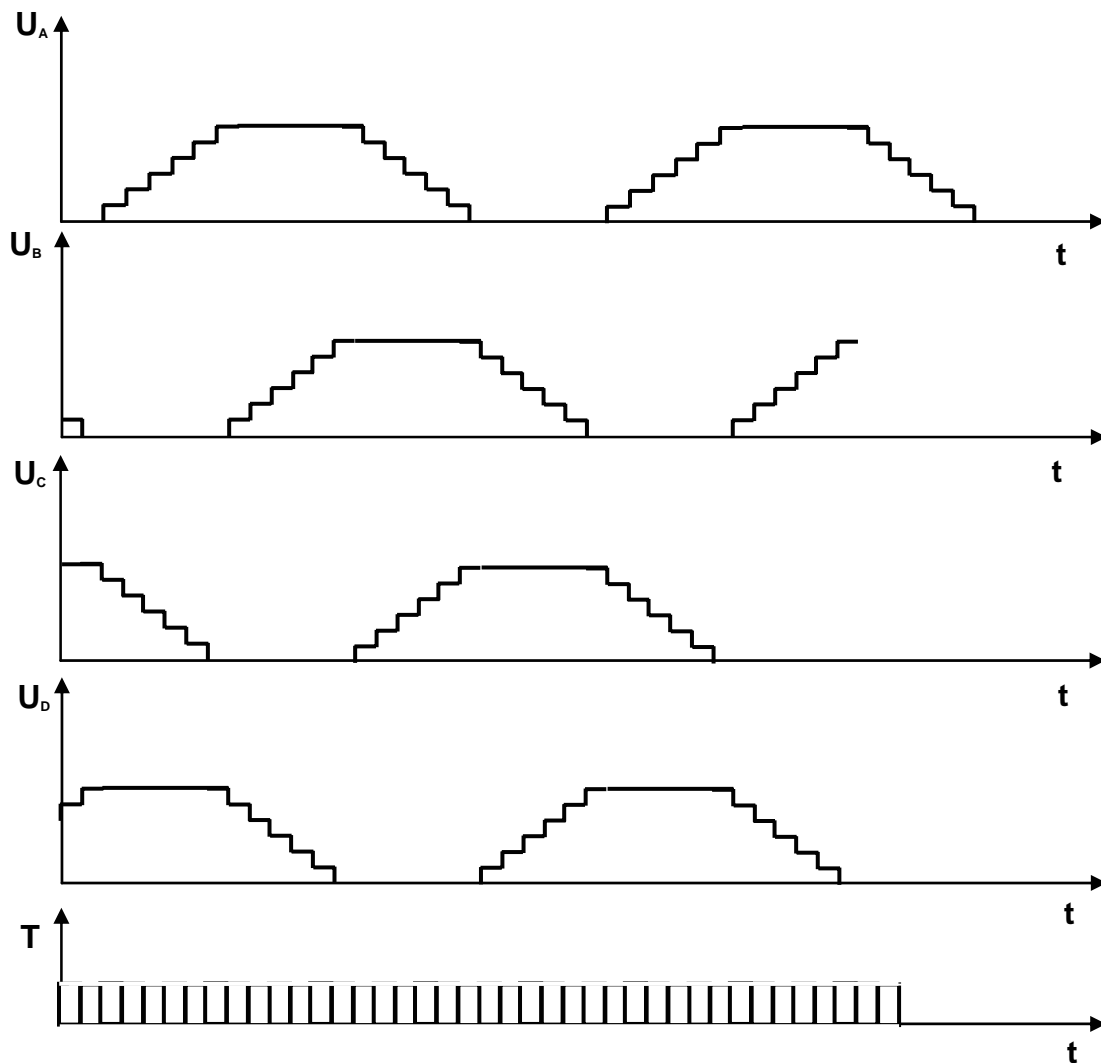
Praca ćwierćskokowa ($\frac{1}{4}$ skoku) umożliwia położenie wirnika pomiędzy dwoma położeniami półskokowymi, dzięki możliwości zasilania jednego całego pasma i połowy drugiego, co jest możliwe w silnikach posiadających dwa uzwojenia na pasmo (do sterowania unipolarnego). Pełny obrót wirnika (dla silnika dwupasmowego) składa się z 16 skoków (rys.14.).



Rys.14. Praca ćwierćskokowa dwupasmowego silnika skokowego przy sterowaniu bipolarnym.

Sterowanie mikroskokowe.

Istnieje możliwość uzyskiwania n – położeń pośrednich wirnika w obszarze jednego skoku podstawowego. Taki sposób sterowania przyjęto nazywać sterowaniem mikroskokowym. Sterowanie mikroskokowe można przedstawić przy pewnym uproszczeniu jako komutację quasitrapezoidalną (rys.15.). Zbocza narastające i opadające przebiegu quasitrapezoidalnego są zazwyczaj formowane wg dwóch sposobów. Pierwszy z nich polega na wprowadzeniu do układu sterującego przetwornika c/a oraz wzmacniaczy liniowych, które zastępują standardowo stosowane dwustanowe klucze półprzewodnikowe.

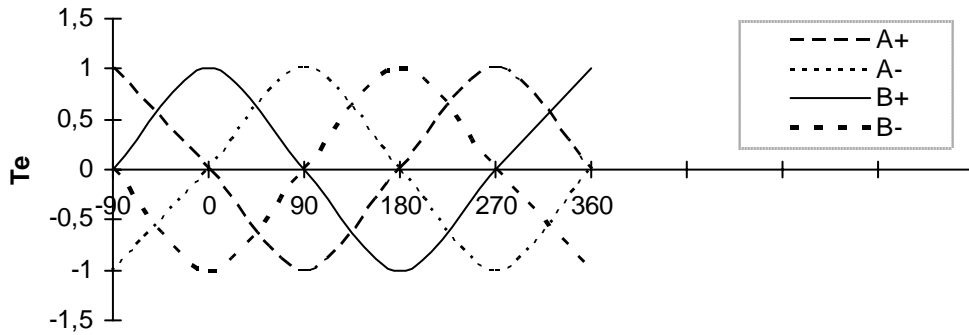


Rys.15. Komutacja quasitrapezoidalna przy sterowaniu mikroskokowym silnika skokowego.

Drugi sposób polega na generowaniu przez układ sterujący sygnału o modulowanej szerokości impulsu, który jest wprowadzany bezpośrednio na dwustanowe klucze półprzewodnikowe. Drugi sposób umożliwia zazwyczaj prostszą realizację układu sterującego.

Sterowanie mikroskokowe zmniejsza elementarny skok silnika n razy, natomiast zależność momentu od odchylenia od położenia równowagi pozostaje nie zmieniona.

Sterowanie quasitrapezoidalne nie pozwala uzyskać dokładnego podziału skoku na n równych części.



Rys.16. Sterowanie sinusoidalnie w dyskretnych poziomach silnika skokowego.

Otrzymamy dokładny podział kierując się zależnościami. Dla momentu w dwufazowym silniku skokowym hybrydowym przyjmujemy położenie zerowe kąta elektrycznego jako początek prądu dla pasma A (i_{A+}). Kąt elektryczny rozumiany jest jako kąt następujących po sobie faz zasilania silnika.

$$T_A = -k i_A \sin \Theta$$

$$T_B = +k i_B \cos \Theta$$

Pełna zmiana faz zasilania o kąt elektryczny 360° powoduje skok o jeden ząbek (skok). Łączny moment może być, przy jednoczesnym zasilaniu obu faz

$$T_{AB} = k(-i_A \sin \Theta + i_B \cos \Theta)$$

Zmieniając prąd zasilający zgodnie z zależnością

$$i_A = I_R \cos \mu \quad i_B = I_R \sin \mu \quad \text{gdzie } \mu - \text{skok mikroskoku.}$$

Wprowadzając zależność

$$T_{AB} = k I_R (-\cos \mu \sin \Theta + \sin \mu \cos \Theta) = -k I_R \sin(\Theta - \mu)$$

Aby pozycja była stabilna $T_{AB}=0$, co daje $\Theta = \mu$. Zmieniając sinusoidalnie w dyskretnych poziomach określonych z równań T_{AB} , i_A i i_B można uzyskać dla silnika skokowego o 200 skokach na obrót, aż po 25000 mikroskoków dla jednego obrotu.