

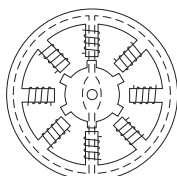
# Silniki elektryczne w praktyce elektronika, część 3

Analizując powyższą definicję stwierdzimy, że obejmuje ona także silniki bezszczotkowe BLDC, opisane w poprzedniej części artykułu. Klasyfikowanie silników BLDC jako krokowych nie jest błędem lecz wprowadza czasem niejasności utrudniające wybór odpowiedniego silnika z oferty dystrybutorów. Podstawową cechą odróżniającą klasyczne silniki krokowe od BLDC jest możliwość pracy silników krokowych w otwartej pętli tzn. bez sygnału zwrotnego informującego o położeniu kątowym wirnika. Żeby jeszcze bardziej pogmatwać klasyfikację - istnieją także silniki krokowe trójfazowe, a nawet 5-fazowe. W takiej sytuacji odróżnienie 3-fazowego silnika BLDC od 3-fazowego silnika krokowego wymaga szczegółowej analizy danych katalogowych.

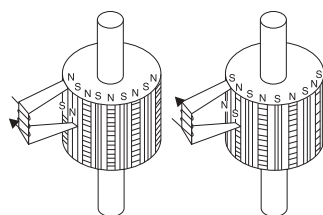
## Parametry silników krokowych

Podstawowe parametry katalogowe silników krokowych są nieco inne niż pozostałych typów silników. Na przykład nie podaje się obrotów znamionowych i napięcia pracy silnika. Bez zmian pozostaje moment obrotowy - podstawowa informacja o każdym rodzaju silnika. Inne parametry wymieniono poniżej:

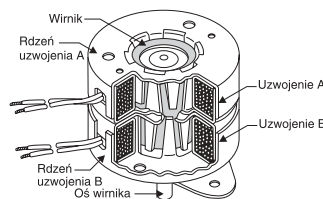
- Moment trzymający: w silnikach krokowych zwykle jedno z uzwojeń jest zasilane, nawet gdy silnik się nie obraca. Powoduje to, że silnik „przeciwstawia się” próbom obrócenia wirnika w inne położenie. Moment trzymający zwykle jest mniejszy od momentu obrotowego, podawany jest w Nm lub Ncm (dla określonego prądu uzwojenia).
- Krok podstawowy: przesunięcie kątowe wirnika przypadające na jeden impuls prądowy. Podawany jest w stopniach kątowych, typowe wartości: 15°, 7,5°, 3,6°, 1,8°, 0,9°. Wartościom tym odpowiadają następujące liczby kroków/obrót: 24, 48, 100, 200, 400.



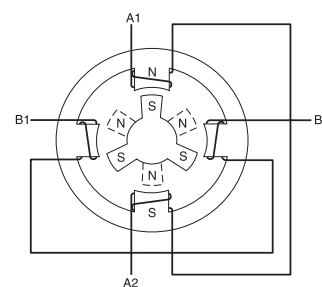
Rys. 21



Rys. 22



Rys. 23



Rys. 24

**Silnik krokowy definiowany jest następująco: „Jest to silnik przekształcający ciąg sterujących impulsów elektrycznych na ciąg przesunięć kątowych wirnika. Droga kątowa, którą przebywa wirnik, jest proporcjonalna do liczby impulsów, a prędkość części ruchomej silnika do częstotliwości tych impulsów. Kierunek obrotu zależy od sekwencji impulsów. Silnik przetwarza sygnał sterujący na ustalone położenie wału bezpośrednio”. Takie właśnie silniki opisujemy w trzeciej części artykułu.**

- Prąd znamionowy uzwojenia: natężenie prądu wymagane do zmiany położenia kątowego (pod obciążeniem nieprzekraczającym znamionowego momentu obrotowego). Jeżeli nie jest potrzebny pełny moment obrotowy, to można stosować niższe, natomiast niewskazane jest wyższe natężenie prądu. Typowe wartości wynoszą od 0,5 do 7A.
- Rezystancja uzwojenia: jest to rezystancja dla prądu stałego, zwykle rzędu pojedynczych omów.
- Napięcie pracy uzwojenia: dla stanu ustalonego napięcie to wynika z pomnożenia prądu i rezystancji uzwojenia. Parametr, nie zawsze podawany, jest przydatny do doboru odpowiedniego napięcia zasilania sterownika.
- Parametry zmiennoprądowe uzwojeń: tu występuje pewna dowolność - producenci podają indukcyjność uzwojeń, maksymalną częstotliwość impulsów lub czasy narastania prądu w uzwojeniach. Generalnie są to parametry decydujące o doborze układu sterownika i teoretycznej maksymalnej prędkości obrotowej silnika (w praktyce maksymalne obroty często ogranicza rezonans mechaniczny wirnika, spowodowany skokową rotacją).

Dla silników krokowych nie podaje się mocy znamionowej, ponieważ moc oddawana do obciążenia zależy od aktualnej prędkości obrotowej silnika. W ty-

powych zastosowaniach silniki krokowe rozwijają moce od jednego do kilkudziesięciu watów.

## Konstrukcja silników krokowych

Najbardziej rozpowszechnione są trzy rodzaje silników krokowych: o zmiennej reluktancji, z magnesem trwałym, hybrydowe. Obecnie silniki o zmiennej reluktancji spotyka się głównie wśród starszych modeli „z odzysku”, natomiast masowo produkowane są silniki pozostałych dwóch typów.

Silnik o zmiennej reluktancji (VR - *Variable Reluctance motor*) ma wirnik wykonany z miękkiej stali z naciętymi charakterystycznymi zębami (jak pokazano na rys. 21). Przepływ prądu stałego przez uzwojenie powoduje, że zęby wirnika ustawiają się naprzeciw zasilanego uzwojenia. Ruch obrotowy powstaje wskutek naprzemiennego zasilania uzwojeń. W silnikach VR nie występuje zmiana kierunku prądu w uzwojeniach, dlatego zwykle wykonywane są jako 3-fazowe lub 4-fazowe i wymagają nieco innego sposobu sterowania niż pozostałe rodzaje.

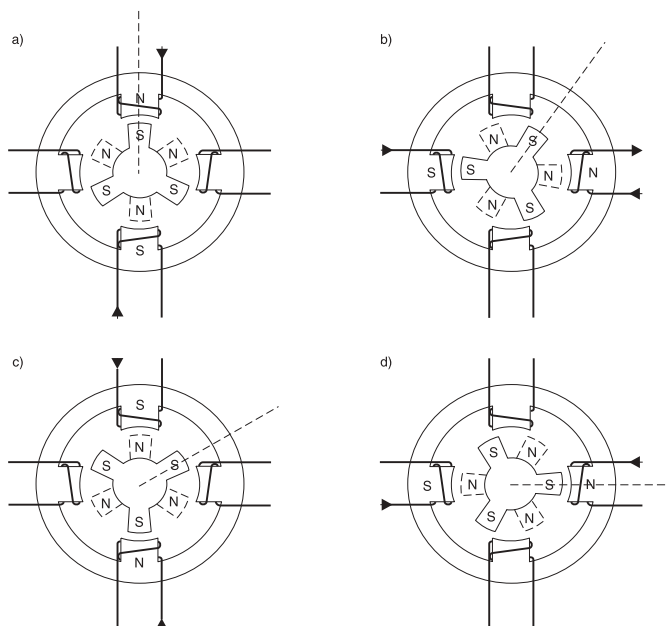
Wirnik silnika z magnesem trwałym (PM - *Permanent Magnet motor*) nie posiada zębów, jest wykonany w postaci walca naprzemiennie namagnesowanego biegunami N i S, natomiast specyficzny rodzaj „zębów” posiada rdzeń stojana. Zależnie od kierunku prądu w uzwojeniu - przyciągane są odpowiednie

bieguny wirnika (rys. 22). W tym przypadku poza naprzemiennym sterowaniem uzwojeń A i B występuje także zmiana kierunku przepływu prądu (tzw. sterowanie bipolarne). Silniki PM mają małą rozdzielczość kąta - typowy krok 7,5° i 15°, a ich zaletą jest niski koszt. Budowę silnika krokowego z magnesem trwałym przedstawiono na rys. 23. To rozwiązanie konstrukcyjne jest nazywane w terminologii angielskiej *canstack motor*.

W silniku hybrydowym (HB - *Hybrid motor*) połączono oba powyższe rozwiązania. Wykorzystanie zalet obu technologii pozwoliło na poprawę parametrów silnika: momentu obrotowego, maksymalnej prędkości obrotowej, rozdzielczości kroku. Niestety silniki hybrydowe są 2...3-krotnie droższe od silników z magnesem trwałym. Wirnik silnika hybrydowego zbudowany jest z uzębionych nabiegunków oraz magnesu trwałego, powodującego naprzemiennie namagnesowanie zębów biegunami N i S. Uzębiony stojan ma konstrukcję podobną jak w silniku o zmiennej reluktancji.

## Sterowanie silników krokowych

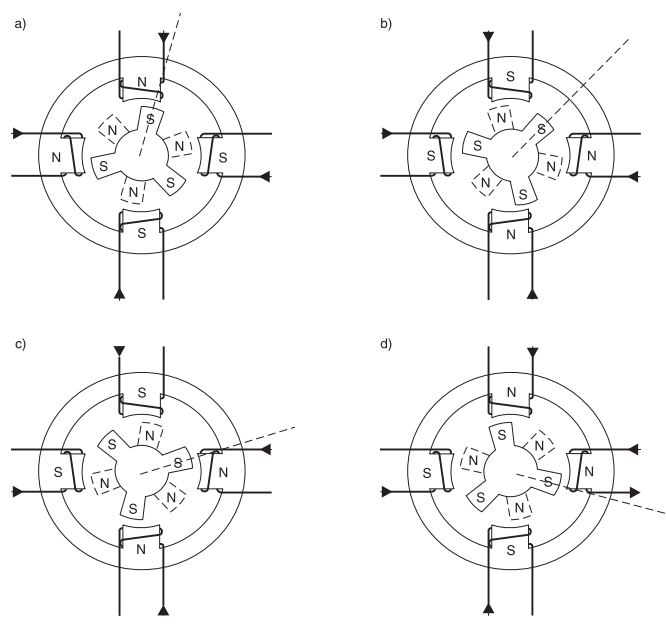
Najpierw omówimy najprostszyszy sposób sterowania 2-fazowych silników PM i HB - tzw. sterowanie falowe. Uproszczony model silnika hybrydowego



Rys. 25

o kroku  $30^\circ$  jest przedstawiony na rys. 24. Wirnik silnika składa się z dwóch nabiegunków, posiadających po 3 zęby. Stojan ma 4 zęby, na których są nawinięte uzwojenia A i B, każde podzielone na dwie sekcje. W przypadku braku zasilania

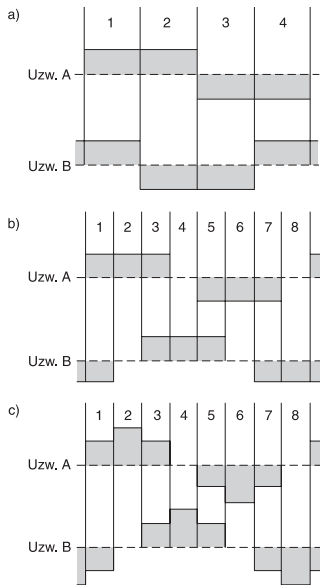
wirnik ustawi się w jednej z pozycji przedstawionych na rys. 25. Dzieje się tak dlatego, że namagnesowany wirnik usiłuje zająć taką pozycję, aby reluktancja obwodu magnetycznego była jak najmniejsza tzn. aby namagnesowane zęby wirnika były



Rys. 26

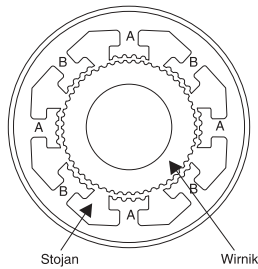
ustawione w jednej linii z dowolną parą zębów stojana. Nie wielki moment obrotowy powodujący takie pozycjonowanie wirnika nazywa się momentem spoczynkowym (bezprądowym). Silnik przedstawiony na rysunku ma 12 możliwych pozycji

spoczynkowych. Jeżeli przez uzwojenie A popłynie prąd, to wirnik zajmie pozycję jak na rys. 25a - przeciwne bieguny wirnika i stojana naprzeciw siebie. W takim stanie moment obrotowy niezbędny do wytrącenia wirnika z położenia równowagi



Rys. 27

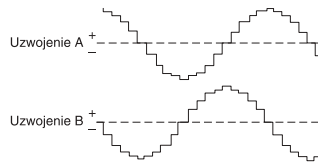
jest znacznie większy niż w stanie bezprądowym - jest to tzw. moment trzymający. Jeżeli teraz przełączymy zasilanie z uzwojenia A na B (zmieniając odpowiednio polaryzację), to wirnik obróci się w prawo o kąt  $30^\circ$  wykonując jeden krok (rys. 25b). Ponowne przełączenie na



Rys. 28

uzwojenie A ze zmianą polaryzacji to kolejny krok (rys. 25c) i znowu uzwojenie B - to czwarty krok (rys. 25d). Sekwencja zasilania uzwojeń A+, B+, A-, B- powoduje wykonanie cyklu 4 kroków w prawo, powtórzenie tej sekwencji to kolejne 4 kroki. Jeżeli zastosujemy sekwencję A+, B-, A-, B+, to wirnik wykoną 4 kroki w lewo. Przy sterowaniu falowym uzwojenia zasilane są naprzemiennie, co uniemożliwia uzyskanie dużego momentu obrotowego.

W trybie sterowania pełnokrokowego prąd płynie jednocześnie przez obydwa uzwojenia silnika. W takim przypadku wirnik ustawa się tak, aby jego zęby znajdowały się pomiędzy zębami stojana (rys. 26a), pozycja wirnika jest przesunięta o  $1/8$  kroku w sto-



Rys. 29

sunku do pozycji z rys. 25a. Obrót wirnika o jeden krok następuje poprzez zmianę kierunku przepływu prądu w uzwojeniach. Sekwencja zasilania uzwojeń dla 4 kroków w prawo może być opisana: A+B+, A+B-, A-B-, A-B+. Jednocześnie zasilanie obu uzwojeń umożliwia uzyskanie 2-krotnie większego momentu obrotowego w porównaniu ze sterowaniem falowym.

Jak już zauważyliśmy, występuje przesunięcie o  $1/8$  kroku pomiędzy pozycjami wirnika w zależności od tego, czy zasilane są obydwa uzwojenia, czy tylko jedno. Tę właściwość można wykorzystać do sterowania półkrokowego. Jeżeli na przemian będzie zasilane jedno lub dwa uzwojenia, to za każdym razem wirnik obróci się o  $15^\circ$ , czyli połowę kroku. Wadą takiego rozwiązania jest zmienny moment obrotowy - co drugi krok będzie „słabszy”, ale w niektórych zastosowaniach jest to dopuszczalne (zaletą takiego sterowania jest poprawa płynności ruchu przy małych prędkościach obrotowych). Znacznie lepsze jest sterowanie półkrokowe ze zmiennym prądem - gdy zasilane jest tylko jedno uzwojenie, to natężenie prądu jest większe o ok. 40%. Większe natężenie prądu wyrównuje moment obrotowy dla wszystkich kroków.

Na rys. 27 przedstawiono graficzną ilustrację przepływu prądu przez uzwojenia dla sterowania pełnokrokowego (a), półkrokowego ze stałym prądem (b) i półkrokowego ze zmiennym prądem (c).

Powyższy opis dotyczył modelu silnika o bardzo małej rozdzielczości, rzeczywiste silniki mają znacznie większą liczbę zębów wirnika i stojana.

Na rys. 28 przedstawiono schemat budowy silnika hybrydowego z krokiem  $1,8^\circ$ , co daje 200 kroków/obrót. Wirnik ma nadal dwie sekcje przesunięte względem siebie, ale w każdej sekcji znajduje się po 50 zębów. Stojan jest 8-biegunowy, po 5 zębów na każdym biegunie. Uzwojenia A i B są podzielone na 4 pasma i nawinięte w sposób zaznaczony na rysunku. Odpowiedni stosunek liczby i rozstawu zębów wirnika i stojana powoduje, że przy przełączeniu prądu z uzwojenia A do B następuje obrót pola magnetycznego o  $45^\circ$ , ale wirnik obraca się tylko o  $1,8^\circ$ .

**Przydatne linki (dotyczące silników BLDC i VCM)**

- Polskie:**
- [www.silniki.pl](http://www.silniki.pl) - dystrybutor silników i sterowników (DC, BLDC)
- Zagraniczne:**
- [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com) - firma Allegro Microsystems - producent scalonych sterowników silników, ciekawe poradniki i noty aplikacyjne,
  - <http://us.st.com/stonline/books> - karty katalogowe i noty aplikacyjne sterowników firmy ST Microelectronics,
  - [www.micromo.com](http://www.micromo.com), [www.densitron.com/em](http://www.densitron.com/em), [www.beikimco.com](http://www.beikimco.com) - producenci silników BLDC i VCM,
  - [www.compumotor.com](http://www.compumotor.com) - strona firmy Parker Motion & Control, która opracowała doskonały poradnik Motor Technologies.

Dalsze zwiększenie rozdzielczości i płynności ruchu silnika jest możliwe poprzez sterowanie mikrokrokowe. Powróćmy do układu sterowania z rys. 26, lecz przy założeniu  $I_B = I_A$ . Pozycja wirnika nie będzie wtedy symetryczna, lecz przesunięta w kierunku uzwojenia A. Zmieniając odpowiednio stosunek natężeń prądu w uzwojeniach A i B, można uzyskać dowolną liczbę pośrednich położzeń wirnika pomiędzy pozycjami „pełnokrokowymi”. Jeżeli prąd w każdym uzwojeniu może przyjmować jedną z dwóch wartości, to mamy 3 kombinacje ( $I_A > I_B$ ,  $I_A = I_B$ ,  $I_A < I_B$ ), czyli zmianę położenia o  $1/4$  kroku, przy 3 wartościach natężenia prądu -  $1/8$  kroku itd. Sterowniki o dużej rozdzielczości pozwalają uzyskać nawet do 500 mikrokroków (czyli 100000 kroków na obrót dla silnika 200-krokowego). W takim przypadku wykres prądu w uzwojeniach przypomina dwie sinusoidy przesunięte względem siebie o  $90^\circ$  (rys. 29) i sposób sterowania zaczyna przypominać synchroniczny silnik prądu zmiennego. W praktyce jest możliwe zasilanie silnika krokowego z 1-fazowej sieci prądu zmiennego (oczywiście przez transformator obniżający napięcie). W tym celu jedno uzwojenie łączy się z zasilaniem bezpośrednio, a drugie - przez kondensator o pojemności kilku mikrofaradów. Prędkość obrotowa silnika zależy od jego kroku znamionowego i od częstotliwości sieci (dla 50 Hz i kroku  $1,8^\circ$  będzie to 60 obr./min).

Moment obrotowy przy pracy mikrokrokowej zależy od sumy prądów uzwojeń A i B, czyli będzie się zmieniał dla poszczególnych mikrokroków.

**Jacek Przepiórkowski**