

PODSTAWY TEORETYCZNE

Budowa silnika krokowego, zasada działania

Co to jest silnik krokowy

Silnik krokowy jest urządzeniem elektromechanicznym, które przekształca impulsy elektryczne w dyskretne ruchy mechaniczne. Oś silnika krokowego obraca się o niewielkie przyrosty kąta pod wpływem impulsów elektrycznych, podawanych w odpowiedniej kolejności. Obroty silnika są związane bezpośrednio z podawanymi impulsami na kilka sposobów. Kierunek obrotów osi jest ściśle związany z sekwencją podawanych impulsów, prędkość obrotów zależy od częstotliwości tych impulsów, a kąt obrotu - od ich ilości.

Zalety i wady silników krokowych.

Zalety:

1. Kąt obrotu silnika jest proporcjonalny do ilości impulsów wejściowych.
2. Silnik pracuje z pełnym momentem w stanie spoczynku (o ile uzwojenia są zasilane).
3. Precyzyjne pozycjonowanie i powtarzalność ruchu - dobre silniki krokowe mają dokładność ok. 3 - 5% kroku i błąd ten nie kumuluje się z kroku na krok.
4. Możliwość bardzo szybkiego rozbiegu, hamowania i zmiany kierunku.
5. Niezawodne - ze względu na brak szczotek. Żywotność silnika zależy zatem tylko od żywotności łożysk.
6. Zależność obrotów silnika od dyskretnych impulsów umożliwia sterowanie w pętli otwartej, przez co silnik krokowy jest łatwiejszy i tańszy w sterowaniu.
7. Możliwość osiągnięcia bardzo niskich prędkości synchronicznych obrotów z obciążeniem umocowanym bezpośrednio na osi.
8. Szeroki zakres prędkości obrotowych uzyskiwany dzięki temu, że prędkość jest proporcjonalna do częstotliwości impulsów wejściowych.

Wady:

1. Rezonanse mechaniczne pojawiające się przy niewłaściwym sterowaniu.
2. Trudności przy pracy z bardzo dużymi prędkościami.

Jedną z najbardziej znaczących zalet silnika krokowego jest możliwość dokładnego sterowania w pętli otwartej. Praca w pętli otwartej oznacza, że nie potrzeba sprzężenia zwrotnego - informacji o położeniu. Takie sterowanie eliminuje potrzebę stosowania kosztownych urządzeń sprzężenia zwrotnego, takich jak enkodery optoelektroniczne. Pozycję znajduje się zliczając impulsy wejściowe.

Rodzaje silników krokowych.

Podstawowe rodzaje silników krokowych to:

1. Silniki o zmiennej reluktancji
2. Silniki z magnesem trwałym
3. Silniki hybrydowe

Silnik o zmiennej reluktancji VR (od ang. Variable Reluctance)

Ten typ silnika był przez długi czas bardzo popularny. Jest on chyba najprostszy ze strukturalnego punktu widzenia. Rysunek Rys. 0.1 przedstawia przekrój typowego silnika ze zmienną reluktancją.

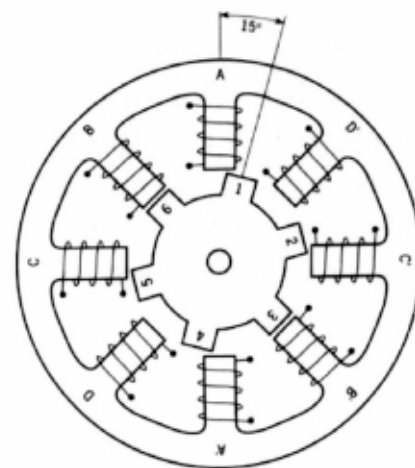
Silnik taki składa się z rotora o wielu zębach wykonanego z miękkiej stali i uzwojonego stojana.

Kiedy uzwojenia stojana są zasilane

prądem stałym, bieguny namagnesowują się. Ruch pojawia się na skutek przyciągania zębów rotora przez zasilane bieguny stojana.

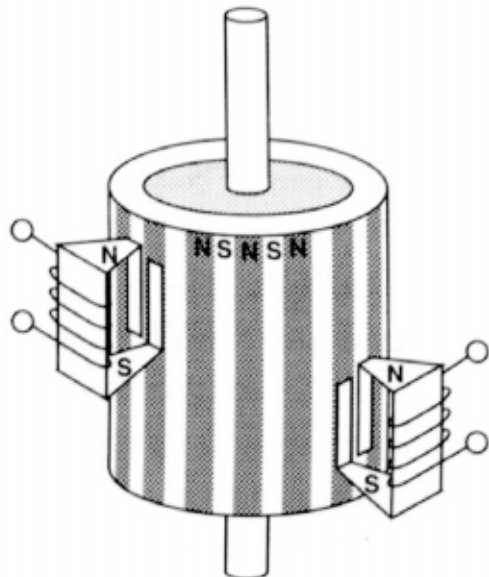
Silnik z magnesem trwałym PM (od ang. Permanent Magnet)

Silniki z magnesem trwałym, często zwane silnikami kubkowymi, są tanie, charakteryzują się niską rozdzielczością o typowych wartościach kąta $7,5^\circ$ - 15° (48 - 24 kroków na obrót). Jak nazwa wskazuje, silniki z magnesem trwałym mają w swej strukturze magnesy



Rys. 0.1. Przekrój poprzeczny silnika o zmiennej reluktancji (VR)

trwałe. Inaczej niż w silnikach o zmiennej reluktancji, rotor nie posiada zębów, lecz jest namagnesowany naprzemiennie biegunami N i S tak, iż bieguny te są usytuowane w linii prostej,

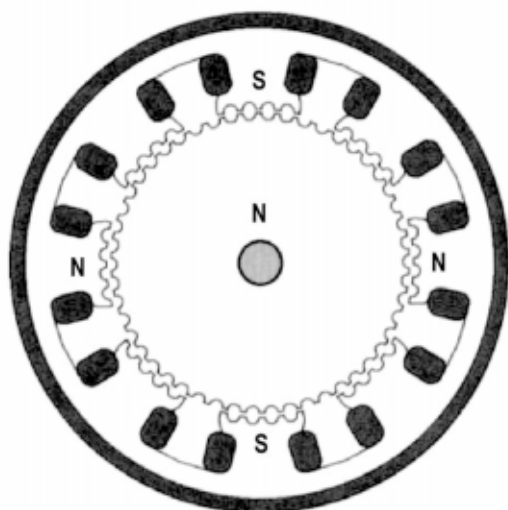


Rys. 0.2. Zasada działania silnika kulkowego z magnesami trwałymi

równoległej do osi rotora. Namagnesowane bieguny rotora wpływają na zwiększenie indukcji magnetycznej, dlatego silniki z magnesem trwałym w porównaniu z silnikami o zmiennej reluktancji mają lepszą charakterystykę momentową.

Silnik hybrydowy **HB** (od ang. **HyBrid**)

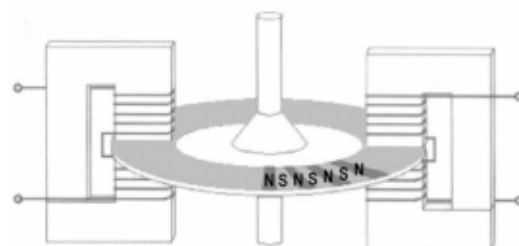
Silnik hybrydowy jest bardziej kosztowny



Rys. 0.3. Przekrój poprzeczny silnika hybrydowego

niż silnik z magnesem trwałym, ale ma lepsze parametry jeśli chodzi o rozdzielczość, moment i szybkość. Typowe kąty silnika hybrydowego mieszczą się w zakresie $3,6^\circ - 0,9^\circ$ (100 - 400 kroków na obrót). Silnik hybrydowy łączy w sobie zalety silnika ze zmienną reluktancją i silnika z magnesem trwałym. Rotor ma wiele zębów jak w silnikach VR i posiada osiowo namagnesowane magnesy umieszczone koncentrycznie wokół osi. Zęby rotora zapewniają lepszą drogę przepływowi magnetycznemu, co dalej polepsza charakterystyki momentu spoczynkowego i dynamicznego w porównaniu z silnikami VR i PM.

Dwa najczęściej używane typy silników krokowych to silniki z magnesem trwałym i hybrydowe. Jeśli projektant nie jest pewien, który silnik będzie najlepszy, w jego aplikacji najlepiej spróbować zastosować najpierw silnik z magnesem trwałym, gdyż jest on zwykle kilkakrotnie tańszy. Jeśli nie - być może lepszy okaże się silnik hybrydowy.



Rys. 0.4. Zasada działania silnika tarczowego produkowanego przez Portescap

Istnieją jeszcze inne typy silników krokowych. Jednym z nich jest silnik tarczowy. Rotor takiego silnika ma kształt dysku z naniesionymi nań magnesami z metali ziem rzadkich (rys. Rys. 0.4). Silnik tarczowy ma pewne zalety, takie jak bardzo mała bezwładność i optymalny obwód magnetyczny bez wzajemnego wpływu uzwojeń stojana. W pewnych zastosowaniach cechy te są niezbędne.

Moc silnika.

Poziomy mocy silników sterowanych przy pomocy układów scalonych mieszczą się zwykle w zakresie od poniżej 1 W dla bardzo małych silników do 10 - 20 W dla większych. Dane dostarczane przez producentów rzadko zawierają maksymalny poziom wydzielanej mocy czy charakterystykę cieplną. Możemy je jednak wyznaczyć z zależności $P = I \cdot U$. Na przykład gdy silnik jest zasilany napięciem 6 V przy prądzie 1 A, na fazę wydzielana jest na nim moc 12 W (przy zasilaniu obu faz). Normalną praktyką jest eksploatacja silnika krokowego przy poziomie wydzielania mocy, przy którym temperatura obudowy silnika osiąga 65°C (więcej niż temperatura otoczenia

w spokojnym powietrzu). Jeśli zatem silnik może być zamontowany na radiatorze, można zwiększyć dopuszczalny poziom wydzielanej mocy. Ważne jest, aby silnik był zaprojektowany do pracy i pracował przy maksymalnym wydzielaniu mocy po to, by był on wydajny z punktu widzenia rozmiaru, mocy wyjściowej i kosztu.

Kiedy używać silnika krokowego.

Użycie silnika krokowego może być trafnym wyborem, kiedy tylko wymagany jest kontrolowany ruch. Mogą być one użyte tam, gdzie trzeba sterować kątem, prędkością, pozycją lub synchronizmem. Z powodu wcześniej wymienionych zalet silniki krokowe znalazły wiele zastosowań np. w drukarkach, ploterach, sprzęcie biurowym, napędach dysków, sprzęcie medycznym, faksach, napędzie przemysłowym i wielu innych. Można je zastosować również zamiast napędu z silnikiem prądu stałego i przekładnią, bez sterowania pozycją - podając tylko impulsy o odpowiedniej częstotliwości.

Obracające się pole magnetyczne.

Kiedy uzwojenie fazy silnika krokowego jest zasilone prądem, w stojanie powstaje indukcja magnetyczna. Jej kierunek jest określony regułą prawej dłoni.

Rysunek Rys. 0.5 pokazuje indukcję magnetyczną, która pojawia się, gdy przez uzwojenie fazy B płynie prąd w zaznaczonym kierunku. Rotor ustawia się wtedy tak, by opór magnetyczny był jak najmniejszy. W naszym przypadku rotor obróciłby się zgodnie z ruchem wskazówek zegara tak, by jego południowy biegun (S) zbliżył się do północnego bieguna stojana B w pozycji 2, a biegun północny (N) - do południowego bieguna stojana B w pozycji 6. Widać teraz, że aby rotor obracał się, trzeba zasilac uzwojenia tak, aby wywołać obracające się pole magnetyczne. Rotor będzie podążał za tym polem za sprawą przyciągania magnetycznego.

Generowanie momentu.

Moment wytwarzany przez silnik krokowy zależy od kilku współczynników:

1. Wielkości kroku
2. Prądu w uzwojeniach
3. Rodzaju pracy

W silniku krokowym moment powstaje na skutek wzajemnego przesunięcia indukcji magnetycznej rotora i stojana. Stojan jest

wykonany z materiału o wysokiej przenikalności magnetycznej, której obecność powoduje, że indukcja magnetyczna jest w większości ograniczona do drogi określonej strukturą stojana w ten sam sposób, w jaki obecność prądu w obwodzie elektrycznym jest ograniczona do przewodnika. Dobrze jest więc, by indukcja magnetyczna była większa przy biegunach stojana. Wyjściowy moment wytwarzany przez silnik jest proporcjonalny do indukcji magnetycznej wywołanej przepływem prądu w uzwojeniu.

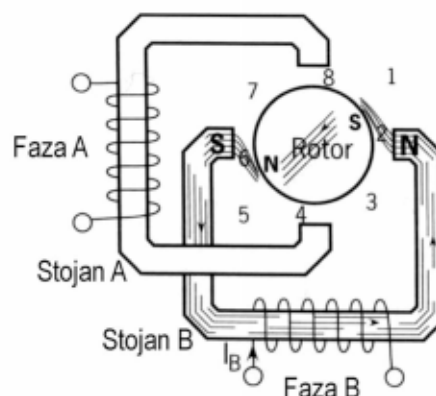
Podstawowy związek definiujący wielkość indukcji magnetycznej wyraża się wzorem:

$$H = \frac{n \cdot I}{l},$$

gdzie:

- n - ilość zwojów,
- I - natężenie prądu,
- H - natężenie pola magnetycznego,
- l - długość drogi indukcji magnetycznej.

Zależność ta pokazuje, że wielkość indukcji magnetycznej, a więc i moment, są proporcjonalne do ilości zwojów, natężenia prądu, a odwrotnie proporcjonalne do długości drogi indukcji magnetycznej. Z tej podstawowej zależności widać, że silniki krokowe o tej samej wielkości mogą mieć bardzo różne momenty wyjściowe w zależności od parametrów uzwojenia.



Rys. 0.5. Droga indukcji magnetycznej w dwubiegunowym silniku krokowym z przesunięciem pomiędzy stojanem a rotorem

Fazy, bieguny i kąty kroku.

Zwykle silniki krokowe mają dwie fazy, choć spotyka się także trój- i pięciofazowe. Silnik bipolarny o

dwóch fazach ma jedno uzwojenie na fazę, natomiast unipolarny ma jedno uzwojenie z odczepem pośrodku. Czasami silnik unipolarny jest nazywany czterofazowym, choć ma tylko dwie fazy. Istnieją także silniki posiadające po dwa uzwojenia na fazę. Mogą one pracować zarówno w trybie bipolarnym jak i unipolarnym.

Biegun może być zdefiniowany jako jeden z obszarów namagnesowanego ciała, gdzie jest skoncentrowane natężenie pola magnetycznego. Zarówno rotor jak i stojan silnika krokowego posiadają dwa bieguny. Rysunek Rys. 0.6 przedstawia uproszczony obraz dwufazowego silnika krokowego o dwóch biegunach (jednej parze biegunów) w rotorze. W rzeczywistości w strukturze rotora jak i stojana jest dodawanych kilkanaście biegunów w celu zwiększenia liczby kroków na obrót silnika, innymi słowy w celu osiągnięcia mniejszej wartości kąta kroku (pełnego). Silnik krokowy z magnesem trwałym zawiera równą liczbę par biegunów w rotorze i w stojanie.

Zwykle silnik PM ma 12 par biegunów, natomiast stojan ma 12 par biegunów na fazę. Silnik hybrydowy posiada uzębiony rotor podzielony na dwie części, między którymi znajduje się magnes trwały. Połowa zębów staje się wtedy biegunami południowymi, a druga połowa - północnymi. Liczba par biegunów jest równa liczbie zębów na połowie rotora. Stojan silnika hybrydowego ma również zęby, aby zwiększyć liczbę równoważnych biegunów w porównaniu z głównymi biegunami, na które są nawinięte uzwojenia (mniejszy rozmiar bieguna, liczba równoważnych biegunów = $360/\text{rozmiar zęba}$). Zwykle dla silników o kącie kroku $3,6^\circ$ używane są cztery bieguny główne, a dla tych o kątach $1,8^\circ$ i $0,9^\circ$ - osiem.

Poniższy wzór przedstawia zależność określającą kąt pełnego kroku silnika krokowego od liczby biegunów rotora, liczby równoważnych biegunów stojana i liczby faz:

$$\text{Kąt kroku} = \frac{360}{n_F \cdot F} = \frac{360}{n},$$

gdzie:

n_F - liczba równoważnych biegunów na fazę równa liczbie biegunów rotora,

F - liczba faz,

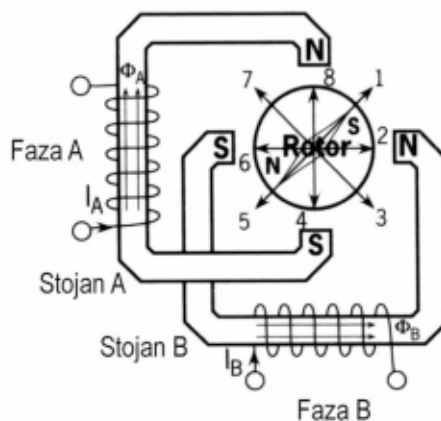
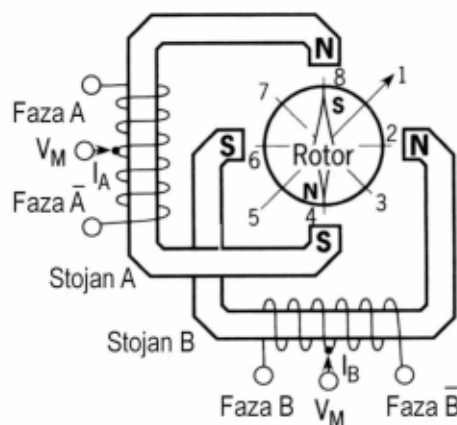
n - całkowita liczba biegunów dla wszystkich faz razem.

Jeśli rozmiary zębów rotora i stojana są różne, zależność ta staje się bardziej skomplikowana.

Rodzaje sterowania silników krokowych.

Najpowszechniejsze rodzaje sterowania to:

1. Falowe (włączona jedna faza)
2. Pełnokrokowe (włączone dwie fazy)
3. Półkrokowe (włączona raz jedna raz dwie fazy)



Rys. 0.6. Silniki krokowe o uzwojeniu unipolarnym i bipolarnym

4. Mikrokrokowe (płynna zmiana prądu silnika)

Podstawowa różnica między trzema pierwszymi rodzajami sterowania a mikrokrokovym jest taka, że nie wymagają one użycia specjalnych układów energoelektronicznych, a jedynie kilku tranzystorów kluczujących.

Klasyczne tryby pracy silnika krokowego

Dla poniższych rozważań najłatwiej jest odwoływać się do rysunku Rys. 0.6.

W sterowaniu falowym w danym momencie zasilana jest tylko jedna faza. Stojan jest zasilany zgodnie z sekwencją $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$, a kroki rotora z pozycji $8 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6$. Dla silników o uzwojeniach unipolarnych i bipolarnych przy tych samych

parametrach uzwojenia taki sposób zasilania wywołuje te same położenia mechaniczne.

Wadą takiego sposobu sterowania jest to, że silniki o uzwojeniach unipolarnych wykorzystują tylko 25%, a o uzwojeniach bipolarnych - 50% całkowitego uzwojenia silnika w danej chwili. Oznacza to, że nie uzyskuje się maksymalnego momentu wyjściowego silnika.

W sterowaniu pełnokrokowym w każdej chwili są zasilane dwie fazy. Stojan jest zasilany zgodnie z sekwencją $AB \rightarrow \overline{AB} \rightarrow \overline{AB} \rightarrow \overline{AB}$, a kroki rotora z pozycji $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7$. Wynikiem sterowania pełnokrokowego są takie same ruchy jak przy sterowaniu z jedną fazą włączoną, ale pozycja rotora jest przesunięta o pół pełnego kroku. Moment wyjściowy silnika o uzwojeniach unipolarnych jest mniejszy niż w silniku bipolarnym (dla silników o tych samych parametrach uzwojeń), gdyż silnik unipolarny wykorzystuje tylko 50% uzwojenia, podczas gdy bipolarny - całe.

Sterowanie półkrokowe jest kombinacją sterowania falowego i pełnokrokowego. Co drugi krok zasilana jest tylko jedna faza, a w pozostałych krokach - dwie fazy. Stojan jest zasilany zgodnie z sekwencją $AB \rightarrow B \rightarrow \overline{AB} \rightarrow \overline{A} \rightarrow \overline{AB} \rightarrow \overline{B} \rightarrow \overline{AB} \rightarrow A$, a kroki rotora z pozycji $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$. Wynikiem tego są obroty rotora równe połowie tych ze sterowania z jedną lub dwiema fazami włączonymi. Sterowanie półkrokowe może zredukować efekt rezonansu mechanicznego, który ujawnia się silnie w dwóch poprzednich rodzajach sterowania.

W sterowaniu mikrokrokowym prądy w uzwojeniach zmieniają się płynnie, rozbijając w ten sposób pełny krok na wiele mniejszych kroczków. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w następnym rozdziale.

Praca mikrokrokowa

Rozdział ten opisuje pracę z mikrokrokiem i będące jej wynikiem polepszenie parametrów pracy systemu. Opisane są w nich również najbardziej istotne czynniki, które ograniczają możliwości pracy z mikrokrokiem oraz metody pokonywania tych ograniczeń.

Czym jest praca mikrokrokowa?

Praca z mikrokrokiem polega na obracaniu polem magnetycznym stojana w sposób bardziej płynny niż w sterowaniu pełno- i półkrokowym. Powoduje to mniejsze drgania i umożliwia bezszumowe poruszanie się silnika do poziomu częstotliwości 0 Hz. Dzięki pracy z mikrokrokiem możliwe jest uzyskanie mniejszych kroków i dokładniejszego pozycjonowania.

Istnieje wiele różnych typów mikrokroku - o podziale od $\frac{1}{3}$ do $\frac{1}{32}$ pełnego kroku lub jeszcze mniejszym. Teoretycznie możliwe jest użycie niecałkowitego podziału kroku, ale jest to często niepraktyczne.

Silnik krokowy jest silnikiem synchronicznym. Oznacza to, że stabilne położenie zatrzymania rotora jest zsynchronizowane z polem magnetycznym stojana. Obroty rotora uzyskuje się przez obracanie pola - rotor podąża do nowego położenia stabilnego. Moment M wytwarzany przez silnik jest funkcją momentu spoczynkowego M_s i odległości pomiędzy polem magnetycznym stojana a pozycją rotora Q_r .

$$M = M_s \cdot \sin(\Theta_s - \Theta_r),$$

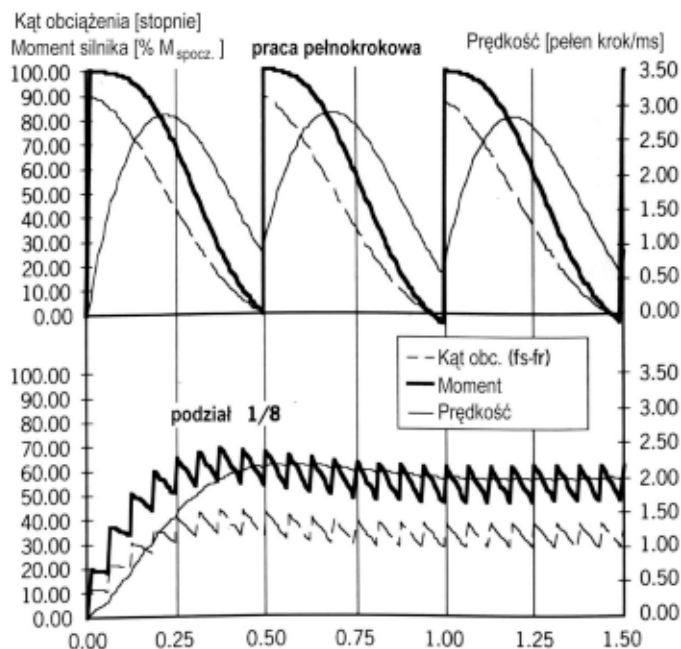
gdzie:

Q_s i Q_r są wyrażone w stopniach elektrycznych.

Zależność między kątami mechanicznymi i elektrycznymi dana jest wzorem:

$$\Theta_{el} = \frac{n}{4} \Theta_{mech},$$

gdzie n oznacza ilość kroków na obrót.



Rys. 0.7. Wahania momentu i prędkości w funkcji obciążenia: a) praca pełnokrokowa, b) praca mikrokrokowa z podziałem 1/8

Kiedy silnik krokowy jest sterowany w sposób pełno- lub półkrokowy, pole magnetyczne stojana obraca się o odpowiednio 90 i 45 stopni elektrycznych

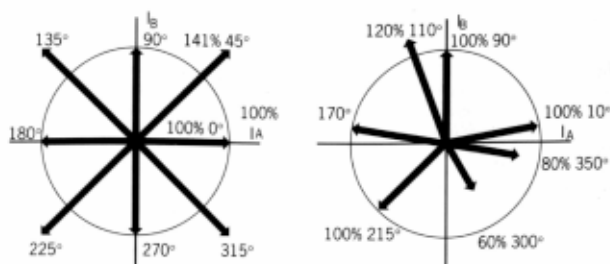
na każdy krok silnika. Z powyższego wzoru wynika, że w silniku powstaje moment pulsujący (patrz rys. Rys. 0.7a), który również pokazuje wahania prędkości wywołane wahaniami momentu). Dzieje się tak dlatego, że $Q_s - Q_r$ nie jest stałe w czasie ze względu na nieciągłe zmiany Q_s .

Wytwarzanie momentu obracającego się o 90 i 45 stopni jest proste, gdyż potrzebne są tylko dwa poziomy prądy: I_{on} oraz 0. Można je łatwo uzyskać za pomocą dowolnego sterownika. Dla danego kierunku obrotów pola magnetycznego stojana poziomy prądów odpowiadające temu kierunkowi można obliczyć z następujących wzorów:

$$I_A = I_{max} \cdot \sin \Theta_s,$$

$$I_A = I_{max} \cdot \cos \Theta_s.$$

Używając różnych wartości I_{on} oraz 0 w obu uzwojeniach możemy uzyskać 8 różnych



Rys. 0.8. Kierunki indukcji magnetycznej a) przy pracy pełno- i półkrokowej, b) przy pracy mikrokrokowej (długości wektorów są proporcjonalne do momentu),

kombinacji prądów w uzwojeniach. To daje nam 8 pozycji (przy których włączona jest jedna bądź dwie fazy), odpowiadających kierunkom indukcji magnetycznej od 0, 45 do 315 stopni elektrycznych (patrz rys. Rys. 0.8a).

Jeśli posiadamy sterownik, który może wytworzyć dowolny prąd na poziomie od 0 do 141% prądu nominalnego, możliwe jest wtedy wytworzenie obracającego się pola magnetycznego o dowolnej orientacji (rys. Rys. 0.8b), a zatem wybranie dowolnego kąta elektrycznego kroku np.:

$\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ lub $\frac{1}{32}$ pełnego kroku - czyli odpowiednio 22,5; 11,25 lub 2,81 stopni elektrycznych. Oprócz zmiany kierunku pola magnetycznego można również zmieniać jego natężenie.

Ze wzoru na rozwijany moment silnika widać, że rotor będzie poruszał się zacznie gładzszym ruchem przy niskich częstotliwościach, ponieważ pole magnetyczne stojana, które określa

stabilną pozycję rotora, porusza się bardziej płynnie w porównaniu ze sterowaniem pełno- i półkrokowym (patrz rys. Rys. 0.7b).

Przy częstotliwościach dwu-, trzykrotnie większych niż częstotliwość własna układu, praca mikrokrokowa ma niewielki wpływ na drgania rotora w porównaniu do pełnego kroku. Powodem tego jest filtrujący charakter bezwładności rotora i obciążenia. System taki ma cechy filtra dolnoprzepustowego.

Dlaczego mikrokrok?

W wielu zastosowaniach praca mikrokrokowa pozwala zwiększyć efektywność systemu, a także zmniejszyć jego złożoność i koszt w porównaniu z pracą pełno- i półkrokową. Mikrokrok może być użyty w celu rozwiązania problemów z rezonansami, a także w celu zwiększenia dokładności i rozdzielczości.

Częstotliwości pracy i rezonansowe

Częstotliwość własna f_0 systemu z silnikiem krokowym jest określona przez momenty bezwładności rotora i obciążenia $I_C = I_R + I_O [kg \cdot m^2]$, moment spoczynkowy $M_s [N \cdot m]$ (wraz z metodą sterowania i poziomami prądu) oraz od ilość kroków na obrót n .

$$f_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{nM_s}{I_C}}$$

Jeśli współczynnik tłumienia systemu jest mały, istnieje ryzyko utraty kroków, kiedy silnik pracuje przy

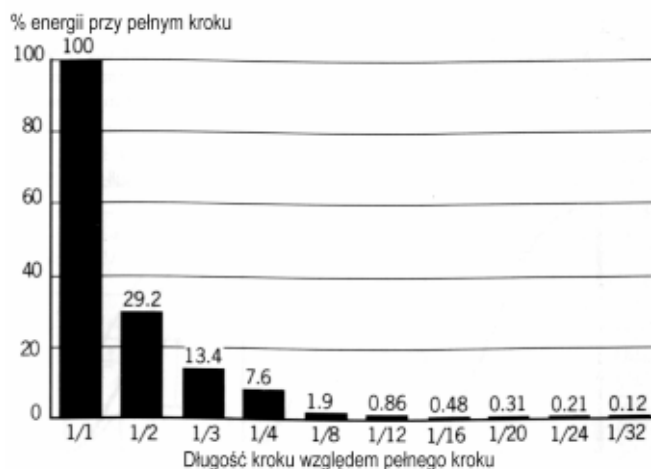
częstotliwości rezonansowej lub blisko niej. Zależnie od typu silnika i całkowitego momentu bezwładności oraz współczynnika tłumienia, problemy te mogą również pojawić się w pobliżu całkowitych wielokrotności i ułamków częstotliwości f_0 :

$$\frac{f_0}{4}, \frac{f_0}{3}, \frac{f_0}{2}, 2f_0, 3f_0, 4f_0 \text{ itd.}$$

Zwykle jednak uwidaczniają się bardziej przy częstotliwościach bliskich f_0 .

mikrokrok o podziale $\frac{1}{32}$ pozostaje tylko 0.1% energii przy pełnym kroku (rys. Rys. 0.10).

Zdawałoby się, że przez zastosowanie sterowania mikrokrokowego można zmniejszyć wielkość energii wzbudzającej do zera. Niestety jest to prawda tylko w odniesieniu do idealnego silnika krokowego - w rzeczywistości jest jeszcze kilka innych źródeł rezonansu. Mimo wszystko jednak zastosowanie mikrokroku polepsza zachowanie układu napędowego w prawie wszystkich zastosowaniach, a w wielu przypadkach daje wystarczającą redukcję zakłóceń i wibracji.



Rys. 0.9. Względna energia wzbudzająca jako funkcja długości kroku elektrycznego

Kiedy używa się sterownika bez mikrokroku, głównym powodem występowania rezonansów jest to, że pole magnetyczne stojana obraca się o nieciągłe wartości kąta elektrycznego (90° dla pełnego i 45° dla półkroku). Wywołuje to pulsujące dostarczanie energii do rotora, który zaczyna wpadać w rezonans. Energia wzbudzająca przekazywana rotorowi podczas jednego kroku jest w najgorszym przypadku (przy braku obciążenia) równa:

$$\frac{4 M_s}{n} (1 - \cos(\Theta_e)),$$

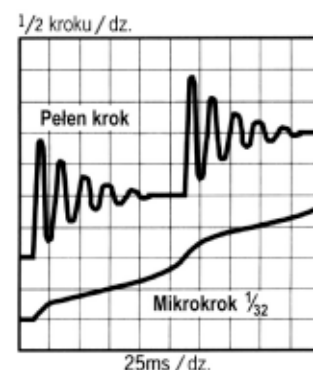
gdzie:

Θ_e - kąt jednego kroku elektrycznego - 90° dla pełnego i 45° dla półkroku.

Widać tu, że praca półkrokowa w porównaniu z pełnokrokową ogranicza energię wzbudzającą rezonans do 29%. Jeśli rozpatrujemy

Rozszerzanie zakresu dynamicznego w kierunku niskich częstotliwości

Kiedy sterujemy silnikiem przy niskich częstotliwościach z pełnym krokiem lub półkrokiem, ruch staje się nieciągły i charakteryzuje się dużym poziomem zakłóceń i drgań. Ma to miejsce przy częstotliwościach poniżej naturalnej częstotliwości układu. W takim przypadku mikrokrok pozwala w łatwy i bezpieczny sposób rozszerzyć zakres częstotliwości w dół do 0 Hz. Zwykle jest wtedy konieczne zastosowanie podziału krokowego



Rys. 0.10. Pozycja rotora jako funkcja trybu pracy

większego niż $\frac{1}{32}$ pełnego kroku. Przy takim

małym kroku energia przekazana rotorowi przy jednym kroku elektrycznym wynosi tylko 0,1 % energii pełnego kroku i jest tak mała, że może być z łatwością pochłonięta przez wewnętrzne tarcie w silniku. Nie powstają wtedy żadne drgania ani silnik nie wybiega w danej chwili poza swoje pożądane położenie (rys. Rys. 0.10). Odchylenie kolejnych pozycji mikrokrokowych rotora od linii prostej zależy wtedy od użycia nieskompensowanych przebiegów wejściowych sinus/cosinus.

Elektroniczna „przekładnia”

W pewnych zastosowaniach, gdzie wymagane są małe względne przemieszczenia albo wysoka rozdzielczość silnik krokowy sterowany mikrokroko-wo może zastąpić przekładnię mechaniczną. W wielu zastosowaniach jest to często lepsze i mniej skomplikowane rozwiązanie, nawet jeśli wymaga użycia większego silnika. W takim przypadku aby osiągnąć najlepsze rezultaty, należy uważnie dobrać typ silnika oraz zapewnić odpowiednie przebiegi wejściowe sinus/cosinus.

Zwiększona dokładność kroków

Praca mikrokrokowa może być także użyta w celu rozszerzenia dokładności pozycjonowania silnika krokowego przy pracy pełno- lub półkrokowej poza wielkość przewidzianą przez

zastosowaniach, gdzie dużą rolę odgrywa kryterium dokładności.

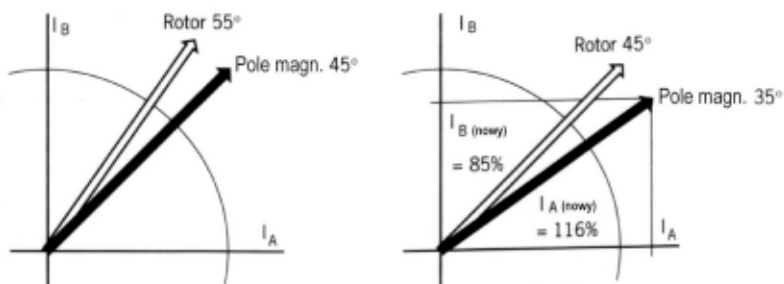
Złożoność systemu

Chociaż układ elektroniczny służący do pracy z mikrokrokiem jest bardziej złożony niż w przypadku pełnego czy półkroku, całkowita złożoność systemu wraz z silnikiem, przekładnią i elementami przenoszenia napędu jest mniejsza, wiąże się zatem z mniejszymi kosztami. Zastosowanie pracy mikrokrokowej może wpłynąć na uproszczenie przekładni i mechanizmów tłumiących drgania, ułatwia też wybór silnika.

W zastosowaniach z mikrokrokiem opartych na mikrokontrolerach można zastąpić zewnętrzne układy modulacji szerokości impulsu, a także przetworniki cyfrowo-analogowe wewnętrznymi elementami mikrokontrolera i wyposażyć go w odpowiednie oprogramowanie. Możliwe jest wtedy osiągnięcie tak niskiego poziomu kosztu urządzenia, że staje się on porównywalny do kosztu tradycyjnego sterownika pracującego z pełnym i półkrokiem.

Co wpływa na jakość mikrokroku

Teoretycznie praca z mikrokrokiem jest prosta i rozwiązuje wszelkie problemy z rezonansem i drganiami. W rzeczywistości jednak wiele różnych zjawisk ogranicza możliwości takiego systemu. Jedne z nich są związane z sterownikiem, inne z silnikiem.



Rys. 0.11. a) Pozycje rotora i wektora indukcji magnetycznej przy pełnym kroku - stan wyjściowy, b) pozycje rotora i wektora indukcji po wprowadzeniu korekty

producenta. Mianowicie w przypadku pracy pełnokrokowej lub półkrokowej pozycje osi silnika w kolejnych krokach mogą się różnić od oczekiwanych. Mając możliwość pomiaru tych odchyłek, można modyfikując nieco wartości prądów w uzwojeniach wprowadzić korektę (rys. Rys. 0.11). Ta technika może być użyteczna w

Dokładność kroków

Zwykle producent podaje dokładność kroku w danych dotyczących silnika. Może ona być bezwzględna (np. $\pm 0,1^\circ$) lub względna (np. $\pm 5\%$)

pełnego kroku), zwykle jednak podawana jest w odniesieniu do trybu z obiema fazami włączonymi (sterowanie pełnokrokowe). Nie mówi się natomiast o tym, jak zachowuje się silnik przy pracy z mikrokrokiem.

Optymalizowanie budowy silnika pod kątem dokładności i wielkości momentu spoczynkowego przy pracy z pełnym krokiem wpływa ujemnie na dokładność pozycjonowania przy pracy z mikrokrokiem. Poniższy przykład pokazuje jeden z ważniejszych efektów.

Rozważmy projekt wykorzystujący podział

1
32
krokowy z silnikiem o pełnym kroku 7,5°.

Teoretycznie jednemu mikrokrokowi odpowiada $\frac{7,5}{32} = 0,23^\circ$, natomiast dla tego typu silnika

powszechna jest dokładność rzędu $\pm 1^\circ$. Oznacza to, że jeśli pozycja bazowa silnika jest skalibrowana względem losowo wybranej pozycji z dwiema fazami włączonymi (która może się znajdować w zakresie $\pm 1^\circ$ względem teoretycznie poprawnej pozycji bazowej), to maksymalna odchyłka rotora na innej pozycji z dwiema fazami włączonymi

wyniesie $\frac{1+(-1)}{0,23} = 8,5$ mikrokroków od pozycji

teoretycznej. Fakt ten powinien być uwzględniony, kiedy projektuje się system mikrokrokowy wymagający dużej dokładności pozycjonowania.

Zgodność z przebiegami sinus-cosinus

Większość silników nie pracuje zgodnie z przebiegami sinus-cosinus (silnik pracujący idealnie z przebiegami prądów sinus-cosinus obraca się ze stałą prędkością). Głównie ze względu na nierównomierną szerokość i powierzchnię szczeliny powietrznej oraz histerezę magnetyczną zachowanie się wektora indukcji magnetycznej, a zatem i pozycji spoczynkowej oraz momentu spoczynkowego rotora odbiega od idealnego. Odchylenia te są zależne od kształtu zębów rotora i stojana oraz od materiału użytego do konstrukcji rdzenia.

Niektóre silniki są optymalizowane pod kątem dokładności i wielkości momentu spoczynkowego przy pracy z pełnym krokiem. Uzyskuje się to kształtując zęby w ten sposób, by na pozycjach z dwiema fazami włączonymi indukcja magnetyczna była szczególnie duża. Ze względu na wielkie odchylenia od pracy zgodnej z przebiegami sinus-cosinus, w aplikacjach mikrokrokowych takich silników powinno się unikać. Innymi słowy im praca silnika przy przebiegach prądów sinus-cosinus jest bliższa idealnej, tym bardziej nadaje się on do mikrokroku.

Odchylenia o których była wyżej mowa mogą być podzielone na dwie kategorie: odchylenia amplitudy wektora indukcji magnetycznej (mające wpływ na moment spoczynkowy) i kierunku tego wektora (mające wpływ na pozycję spoczynkową przy pracy z mikrokrokiem).

Niedokładność pozycji przy pracy z mikrokrokiem

Pozycje spoczynkowe w pracy z mikrokrokiem są efektem zasilania uzwojeń przebiegami sinus i cosinus. Różnica pomiędzy między teoretyczną a rzeczywistą pozycją spoczynkową zwana jest niedokładnością pozycji spoczynkowej. Jest ona zdefiniowana jako średnie odchylenie mikrokrokowej pozycji spoczynkowej od pozycji teoretycznej w obrębie pełnego obrotu, gdy uzwojenia silnika zasilane są prądami o przebiegach sinus-cosinus. Niedokładność pozycji spoczynkowej jest średnią wartością w przedziale całego obrotu, co oznacza, że nie jest ona funkcją niedokładności przy pracy pełnokrokowej. Aby uzyskać całkowity błąd pozycji należy dodać obie niedokładności.

Skutkiem niedokładności pozycji spoczynkowej jest to, że jeśli silnik jest zasilany nieskompensowanymi przebiegami sinus-cosinus, prędkość silnika zmienia się lub inaczej mówiąc zmienia się długość mikrokroku. Przy podziale

1
32
krokowym, mikrokroki o długości od 0,5 do 3

wartości nominalnej są normalne. W systemach pracujących z mikrokrokiem zjawisko to jest najczęstszą przyczyną rezonansów.

Niedokładność momentu spoczynkowego przy pracy z mikrokrokiem

Wielkość indukcji magnetycznej również różni się od wartości teoretycznej kiedy zasilamy silnik przebiegami mikrokrokowymi. Stąd właśnie bierze się niedokładność momentu spoczynkowego. Wartość nominalna momentu spoczynkowego teoretycznie nie zależy od kierunku indukcji magnetycznej kiedy silnik jest zasilany przebiegami sinus-cosinus.

Teoretycznie moment spoczynkowy wyraża się wzorem:

$$M_S = k \sqrt{i_A^2 + i_B^2}$$

Jeśli i_A i i_B są wartościami chwilowymi prądów w obu fazach silnika, to moment spoczynkowy M_S jest niezależny od kierunku indukcji magnetycznej.

Wielkość niedokładności momentu spoczynkowego jest funkcją geometrii zębów stojana i

rotora i waha się w granicach od 10 do 30% wartości nominalnej przy włączonych obu fazach.

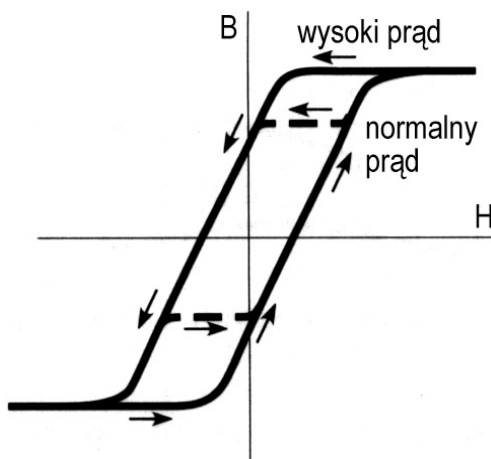
Większość silników jest optymalizowana pod kątem największego momentu spoczynkowego przy sterowaniu pełnokrokowym z obiema fazami włączonymi. Niedokładność momentu spoczynkowego przy pracy mikrokrokowej jest wartością średnią wszystkich odchyłek w obrębie pełnego obrotu i nie powinna być mylona z podawanym przez producenta względnym błędem momentu przy sterowaniu pełnokrokowym z dwoma fazami włączonymi. Kiedy silnik krokowy jest zatrzymywany w pozycjach, w których przez obie fazy płynie ten sam prąd, wartość momentu spoczynkowego waha się o $\pm 10\%$ wartości nominalnej. Te wahania są zależne od tolerancji elementów mechanicznych silnika i nie miałyby miejsca w przypadku jego idealnej geometrii.

Histeresa

Histeresa pozycji spoczynkowych silnika krokowego jest wywołana głównie przez histerezę magnetyczną, ale również częściowo przez tarcie



łożysk rotora. Łatwo ją zauważyć obserwując pozycję rotora przy obrotach zgodnych i przeciwnych do ruchu wskazówek zegara.



Wielkość indukcji B w szczelinie powietrznej jest teoretycznie proporcjonalna do liczby zwojów uzwojenia n i prądu płynącego przez uzwojenie I :

$$B = H\mu,$$

gdzie μ oznacza przenikalność magnetyczną ośrodka, a H - wartość natężenia pola magnetycznego określoną wzorem:

$$H = \frac{nI}{l},$$

tak więc

$$B = \frac{\mu nI}{l}.$$

Ponieważ w większości ośrodków w którym rozchodzi się pole magnetyczne jest rdzeń, właśnie jego przenikalność magnetyczna będzie decydowała o wielkości indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.

Rdzeń jest wykonany z materiału ferromagnetycznego i z powodu istnienia w ferromagnetykach histerezy magnetycznej, zależność powyższa nie jest całkowicie prawdziwa. Wartość chwilowej indukcji magnetycznej jest funkcją chwilowego natężenia pola magnetycznego i jego wartości poprzedniej.

W zastosowaniach, gdzie liczy się dokładność pozycjonowania, konieczne jest czasem zastosowanie „ruchu nadmiarowego”, aby skompensować błąd pozycjonowania wynikający z obecności histerezy.

Kiedy mamy do czynienia z pracą mikrokrokową z wysoką rozdzielczością, błąd wynikający z histerezy może kilkakrotnie przewyższać długość mikrokroku. Przy obliczaniu całkowitej niedokładności pozycjonowania silnika krokowego warto wiedzieć czy producent podając dane dotyczące dokładności wspomina także o histerezie.