

Silniki krokowe

Łukasz Bondyra, Paweł Górka, Jakub Tutro, Krzysztof Wesołowski

3 czerwca 2009

O silnikach krokowych

Silnik krokowy (zwany też skokowym lub impulsowym) jest to rodzaj silnika elektrycznego zasilany impulsowo. W przeciwieństwie do typowych silników elektrycznych, pod wpływem zasilania, wirnik tego typu napędu nie obraca się ruchem ciągłym, lecz wykonuje skoki o ustalony kąt. Kąt ten zależy od budowy silnika i mieści się w granicach od kilku do kilkudziesięciu stopni.

Ze względu na budowę wyróżnia się silniki z magnesem trwałym, silnik o zmiennej reluktancji (reluktancyjny) oraz łączący cechy obu powyższych - silnik hybrydowy. Istnieje też podział na silniki bipolarne (4 wyprowadzenia) oraz unipolarne (5 lub 6 wyprowadzeń).

Dzięki swojej szczególnej budowie i zasadzie działania, silniki krokowe zapewniają wysoki moment obrotowy oraz bardzo wysoką dokładność pozycjonowania. Mogą być one wykorzystywane jako część systemu pozycjonującego pracującego w tzw. pętli otwartej. Pozwala to zredukować koszty związane z użyciem dodatkowych enkoderów oraz pętli sprzężenia zwrotnego niosącej informację o aktualnej pozycji rotora. Z powyższych powodów silniki krokowe znalazły szerokie zastosowanie w dziedzinach, w których istotna jest możliwość precyzyjnego sterowania ruchem, takich jak:

- automatyka (automatyczne zawory)
- robotyka (sterowanie manipulatorami)
- konstrukcja czytników CD/DVD (pozycjonowanie głowicy czytającej)
- drukarki i plotery (sterowanie ruchem głowicy drukującej, przesuw papieru)

Należy też wymienić wady tego typu silników. Najważniejsze z nich to:

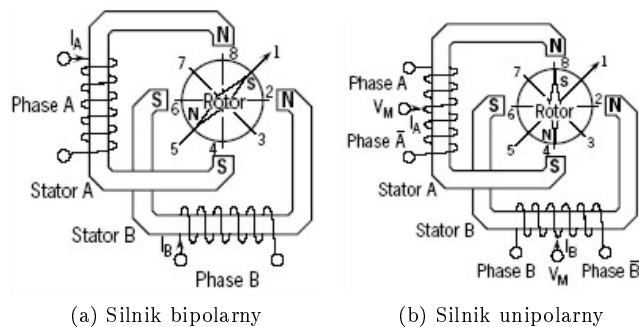
- małe maksymalne obroty (rzędu kilku-kilkuset obrotów na minutę)
- duży pobór prądu
- duża emisja ciepła
- w przypadku zbyt dużego obciążenia silnika - gubienie kroków

Ostatnia wymieniona wada ogranicza niestety stosowanie silników skokowych w przypadku dużych i nie dających się przewidzieć zmian momentów obciążających. W przypadku zastosowania pętli otwartej sterowania, zgubienie kroków może prowadzić nawet do "katastrofy systemu", co w większości przypadków jest absolutnie niedopuszczalną sytuacją.

Sterowanie

Podstawy sterowania

Jak zostało już powiedziane, w przeciwieństwie do silników prądu stałego czy przemiennego, silniki krokowe wymagają zasilania sekwencyjnego. Dlatego też do ich sterowania stosowane są specjalne układy. Dawniej używano prostych układów logicznych zbudowanych na brankach i przerzutnikach. W obecnych czasach najczęściej spotykane są specjalizowane sterowniki w postaci gotowych układów scalonych lub implementowane bezpośrednio na mikrokontrolerach realizację zaawansowanych algorytmów. Występują również nieznaczne różnice w sposobie sterowania pomiędzy silnikami unipolarnymi, a bipolarnymi.



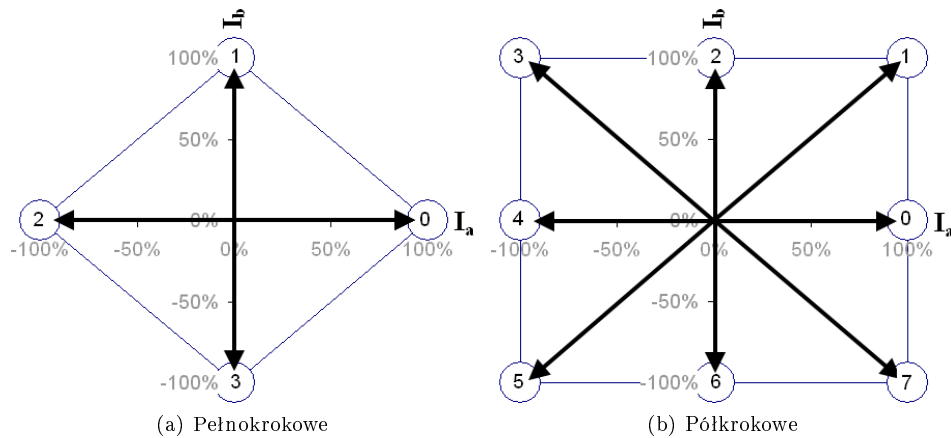
Rysunek 1: Rodzaje silników krokowych

W silnikach unipolarnych, prąd w danym uzwojeniu przepływa zawsze w tym samym kierunku. Ułatwia to realizację sterowania, gdyż nie musi ono zapewniać zmiany biegunowości zasilania. Wiąże się to jednak z używaniem w jednej chwili tylko połowy uzwojenia. Taki sposób sterowania wymaga użycia większego silnika w celu zapewnienia takich samych własności ruchowych. Zdecydowanie lepsze wykorzystanie możliwości silnika zapewnia sterowanie bipolarne. Wymaga ono jednak zmiany biegunowości zasilania w trakcie pracy. Typowym układem stosowanym w tym celu jest mostek H, stosowany także w układach z silnikami prądu stałego.

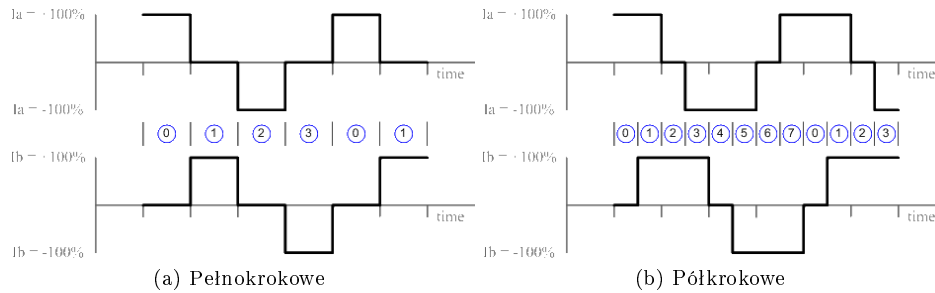
Rysunki 2 i 3 przedstawiają przebiegi sterujące dla dwóch podstawowych sterowań: pełno- i półkrokowego. Rozważania sprowadzamy do sterowania silnikiem bipolarnym o dwóch uzwojeniach. Ze względu na prostotę omawianego zagadnienia pominięty zostanie dodatkowy opis słowny.

Zaawansowane sposoby sterowania

Rozwój techniki cyfrowej i mikroprocesorów pozwolił na opracowanie i wdrożenie o wiele bardziej zaawansowanych sposobów sterowania. Stosując kilka dodatkowych algorytmów potrafimy jeszcze lepiej wykorzystywać silniki, uzyskując znacznie lepsze osiągi przy coraz mniejszych rozmiarach. Sposoby te pozwalają poradzić sobie z kilkoma problemami występującymi przy korzystaniu z silników krokowych.



Rysunek 2: Przebiegi fazowe



Rysunek 3: Przebiegi czasowe

- ograniczona dokładność pozycjonowania - podstawowy skok silnika zależy od jego budowy. Obecnie złożone sposoby sterowania prądami w uzwojeniach pozwalają nam wypozyjonować silnik z rozdzielczością większą niż podstawowa. Taki sposób sterowania, zwany mikrokrokowym, umożliwia uzyskanie pojedynczego skoku o szerokości równej nawet $1/512$ podstawowego.
- nierównomierność pracy - podczas pracy silników krokowych o małej liczbie faz, szczególnie przy małych prędkościach obrotowych, może występować nierównomierna praca. Rozwiązaniem tego problemu (ponownie) jest sterowanie mikrokrokowe. Prąd w uzwojeniach nie jest po prostu włączany i wyłączany lecz stopniowo podwyższany i obniżany co zapewnia płynny ruch wirnika.
- inercja uzwojeń ograniczająca prędkość narastania prądu - najlepszym rozwiązaniem tego problemu jest zasilanie silnika napięciem znacznie wyższym niż znamionowe. Wymaga to jednak specjalnego układu ograniczającego prąd płynący przez uzwojenia. Obniżanie napięcia na uzwojeniu, poprzez odłożenie go na tranzystorze byłoby bardzo nieefektywne, dlatego stosuje się technikę zwaną chopping. Jej istotą jest dwupołożeniowa regulacja nadążna prądu, które w praktyce przypomina kształtem sygnał PWM. Taki sposób zasilania zwiększa moment obrotowy silnika, zwłaszcza przy dużych prędkościach obrotowych. Zapobiega to gubieniu kroków.

Dodatkowo specjalizowane układy ułatwiają wykorzystywanie takich silników. Integrują w sobie zarówno translację prostych sygnałów na odpowiednie sekwencje sterujące, jak i

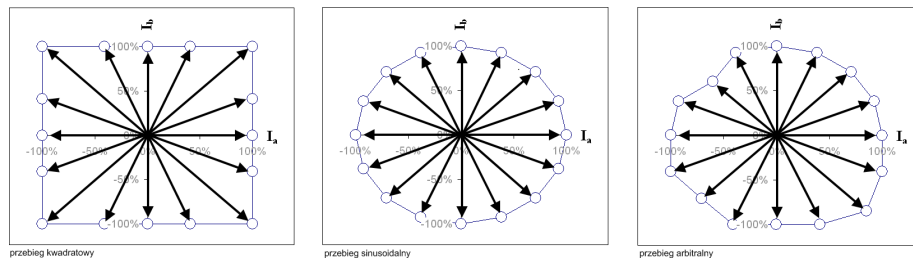
realizacje algorytmów takich jak wspomniane powyżej chopping czy sterowanie mikro krokowe. Dostarczają też wbudowane końcówki mocy. Dlatego też ich zastosowanie znacznie przyspiesza proces projektowania systemów wykorzystujących silniki krokowe jako napędy.

Sterowanie mikro krokowe

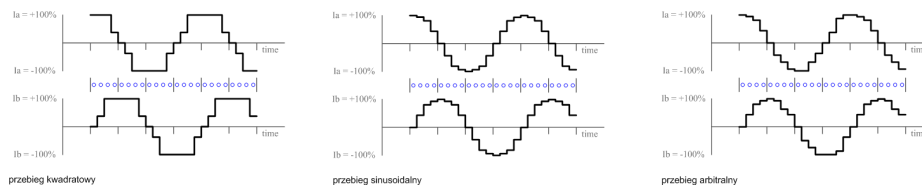
Implementacja sterowania mikro krokowego wymaga od sterownika możliwości zmiany amplitudy prądu w każdym z uzwojeń. Wyróżnia się kilka typowych metod realizacji sterowania mikro krokowego. Mianowicie:

- przebieg kwadratowy - metoda ta zapewnia najwyższy chwilowy moment obrotowy. Odbywa się to jednak kosztem oscylacji wirnika.
- przebieg sinusoidalny - Algorytm ten polega na wymuszeniu w każdym z uzwojeń odpowiednio przesuniętych w fazie, sinusoidalnych przebiegów prądu. Zapewnia stały moment obrotowy. Jest to najczęściej stosowana metoda. Wiele dostępnych opisów sterowania mikro krokowego pomija w ogóle fakt istnienia innych realizacji.
- przebieg arbitralny - ciężko znaleźć uzasadnienie zastosowania tej właśnie metody. W porównaniu do poprzednio wymienionych - przebiegi ilustrujące zasadę jej działania, wydają się być dość nietypowe. Jej prezentacja tutaj służy głównie skupieniu uwagi na fakcie, że istnieje wiele sterowań umożliwiających pracę mikro krokową.

Do opisu realizacji powyższych algorytmów ponownie posłużymy się przebiegami fazowymi i czasowymi prądów w uzwojeniach silnika. Bardzo dobrze oddają one ogólne idee sterowania i zwalniają z dodatkowych opisów słownych. Rozważania ponownie prowadzamy do sterowania silnikiem bipolarnym o dwóch uzwojeniach.



Rysunek 4: Przebiegi fazowe prądu w uzwojeniach



Rysunek 5: Przebiegi czasowe prądu w uzwojeniach

Przykładowy projekt sterownika silników krokowych na bazie układu A3977

Istnieje wiele sposobów realizacji sterowników do silników krokowych, poczynając od automatów zbudowanych na bramkach logicznych i przerzutnikach, aż po projekty sterowników na mikrokontrolerze. Pozwalają one dostosować implementację odpowiednich algorytmów regulacji do konkretnych potrzeb. Bardzo dobrą alternatywą, szczególnie w przypadkach, gdy sterownik nie musi posiadać żadnych nietypowych funkcji, jest skorzystanie z jednego z gotowych układów sterowników. Wielu producentów oferuje szeroką gamę wyspecjalizowanych układów scalonych, zaprojektowanych specjalnie do sterowania silnikami krokowymi. Wybór jest naprawdę duży. Niektóre z nich mają zintegrowaną końcówkę mocy, inne wymagają podłączenia zewnętrznego mostka H. Standardem jest już mikrokrok i chopping. Jak wspomniano już wyżej, niektóre układy umożliwiają sterowanie nawet z rozdzielczością do 1/512 kroku.

Opis i parametry układu A3977

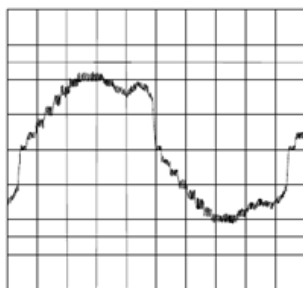
W tym rozdziale zaprezentowana zostanie przykładowa realizacja sterownika silników krokowych w oparciu o układ firmy Allegro – A3977. Wybrano ten układ ze względu na niezbyt wygórowaną cenę, dobrą funkcjonalność oraz parametry:

- Sterowanie bipolarne
- Wbudowana końcówka mocy w postaci dwóch mostków H (po jednym na fazę)
- Zasilanie części mocy napięciem 8-35V
- Maksymalny prąd wyjściowy do 2,5A na fazę
- Sterowanie pełnokrokowe, półkrokowe, 1/4 i 1/8 kroku
- Chopperowe sterowanie prądem
- 3 tryby gaszenia: slow decay, fast decay i mixed decay
- Wewnętrzna logika pozwalająca na łatwe sterowania tylko trzema sygnałami.

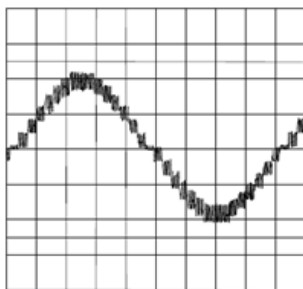
Tryby gaszenia

Interesującą funkcjonalnością są 3 tryby gaszenia prądu w uzwojeniach. Standardowym trybem pracy w sterownikach jest tryb slow decay - czyli wolne gaszenie. Jest to najprostszą opcją polegającą na wyłączeniu zasilania uzwojenia i czekaniu, aż napięcie samoczynnie opadnie. Dużą zaletą tej metody są małe tętnienia. Zniekształca ona jednak sygnał sterujący. Rzeczywisty przebieg, zmierzony oscyloskopem przy pracy w trybie slow decay, przedstawia rysunek nr 6.

Wyraźnie widać, że przy opadającym zboczku sinusoidy przebieg jest bardzo zniekształcony. Silnik sterowany takim sygnałem często wydaje nieprzyjemny, piskliwy dźwięk. Alternatywą dla trybu slow decay jest tryb fast decay, który polega na włączaniu odpowiednich tranzystorów i podawaniu na uzwojenia napięcia o przeciwnej polaryzacji, by przyspieszyć jego opadanie. Przebieg sterowania w trybie fast decay przedstawiono na rysunku nr 7.

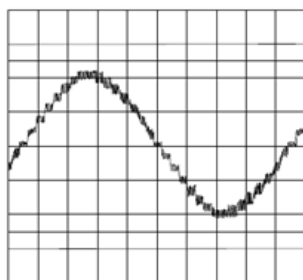


Rysunek 6: Przebieg prądu przy wygaszaniu w trybie slow decay



Rysunek 7: Przebieg prądu przy wygaszaniu w trybie fast decay

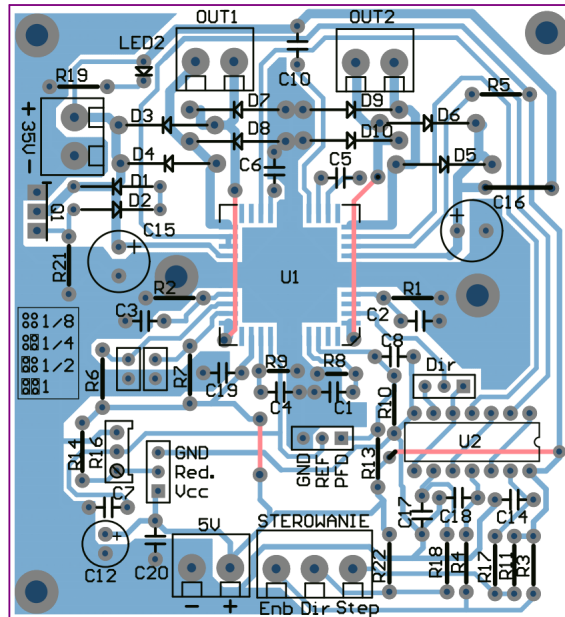
Przebieg w tym przypadku jest prawie w ogóle niezniekształcony. Pojawia się natomiast inny problem. Wartość tętnień napięcia jest zdecydowanie większa niż w poprzednim przypadku. Jest to niewątpliwą wadą tego trybu gaszenia i powoduje nadmierne grzanie się silnika. Kompromisem pomiędzy tymi dwoma trybami jest tryb mixed decay. Praca w tym trybie polega na tym, że gdy prąd w uzwojeniu przekroczy wartość maksymalną (odpowiednią dla danego kroku/mikrokroku) uaktywniany jest tryb fast decay. Sterownik pracuje w tym trybie, dopóki napięcie na pinie RC nie spadnie do wartości takiej jak na pinie VPFD. Wtedy sterownik powraca w tryb slow decay. Pozwala to otrzymać nie zniekształcony sygnał sterujący, przy jednocześnie niskiej wartości tętnień napięcia. Przebieg z oscyloskopu podczas pracy w tym trybie przedstawia rysunek 8.



Rysunek 8: Przebieg prądu przy wygaszaniu w trybie mixed decay

Schemat i projekt PCB

Przygotowano przykładową aplikację sterownika silnikiem krokowym w oparciu o opisywany układ A3977. Rysunek 9 przedstawia schemat PCB wykonanej płytki. Załączono również schemat połączeń.



Rysunek 9: Projekt PCB

Praktyczne uwagi na temat projektowania sterownika

Podczas projektowania sterownika należy odpowiednio dobrać wartości rezystorów R1 i R2. Sposób doboru jest opisany w dokumentacji. W zależności od ich wartości i wartości napięcia na pinie VREF, ustawianego potencjometrem R16, określany jest prąd maksymalny. Układ 74HC14 nie jest niezbędny - został zastosowany w celu dopasowania napięć wejściowych. Umożliwienia zmiany kierunku (zwora DIR NEGATION). Na goldpinach wyprowadzono piny VREF i PFD by łatwo można było mierzyć na nich napięcia. Diody D3-D10 nie są wymagane przy sterowaniu z maksymalnym prądem nie większym niż 2A. Układ wymaga zasilania z dwóch źródeł: 5V dla logiki i 8V-35V dla końcówki mocy. Uzwojenia silników podłączamy do złączy OUT1 i OUT2. Układ sterowany jest tylko trzema sygnałami:

- ENABLE - sygnał niski na tym wejściu włącza układ i przepływ prądu w silniku
- DIR - sygnał wysoki lub niski podany na to wejście, decyduje o kierunkach obrotu wirnika
- STEP - impulsy (narastające) podawane na to wejście powodują obrót o jeden krok/mikrokrok

Ważnym aspektem podczas projektowania układu jest odpowiednie po prowadzenie ścieżek na PCB i umieszczenie dużego pola miedzi pod układem w celu polepszenia warunków chłodzenia. Po zmontowaniu układ wymaga tylko ustawienia prądu maksymalnego za pomocą potencjometru R16, zgodnie ze wzorami zawartymi w dokumentacji.

Bibliografia:

- dokumentacja układu A3977
- <http://www.zaber.com/wiki/Tutorials/Microstepping>
- źródła własne