

Elektor w EdW

SILNIKI KROKOWE

Budowa, funkcjonowanie i sterowanie

Silniki krokowe są znane już od początku lat 60. dopiero jednak w ostatnich latach nabrały one dużego znaczenia. Znajdują zastosowanie jako napędy w mechanizmach zegarów i innych instrumentów wskaźnikowych, w drukarkach i ploterach oraz w przeróżnych maszynach warsztatowych i w robotach.

Podobnie jak i inne silniki składają się one z nieruchomego statora oraz z obracającego się rotora. O ile w silnikach prądu stałego rotor (a czasami także i stator) jest wyposażony w elektromagnes, to silniki krokowe posiadają wyłącznie stacjonarne elektromagnesy. Rotor zbudowany jest z miękkiej, nie magnetyzującej się stali albo z magnesu stałego. Obraca się na skutek oddziaływania różnorodnie ułożonych pól elektromagnetycznych statora. Zanim jednak dowiedzieliśmy się, w jaki sposób funkcjonuje silnik krokowy, zapoznaliśmy się z jego bardzo ważną zaletą – do rotora nie jest doprowadzany prąd, tak więc odpada konieczność stosowania ulegających zużyciu szczotek i pierścieni ślizgowych!

Pierwsze, w miarę atrakcyjne ekonomicznie reaktancyjne (reluktancyjne) silniki krokowe posiadały rotor wykonany z miękkiej stali magnetycznej w formie zębatego rdzenia. Pomijając fakt, że silniki te posiadały niezbyt duży moment obrotowy, to oprócz

tego nie posiadały one “ustalonego położenia”, gdyż rdzeń z miękkiej stali magnetycznej sam nie wytwarzał żadnego pola magnetycznego. Z tej właśnie przyczyny zostały wprowadzone silniki krokowe z magnesami trwałymi. Wprawdzie rotor, posiadający trwałe właściwości magnetyczne, stwarzał możliwość zdefiniowania określonego położenia ustalonego, to jednak było to możliwe wyłącznie przy większych kątach przypadających na jeden krok. Przyczyna była prosta – na cylindrycznym rotorze namagnesowanym radialnie można było umieścić ograniczoną liczbę biegunów magnetycznych. Pomimo tego taki typ silników krokowych może posłużyć jako materiał wejściowy do zapoznania się z tematem. Na **rysunku 1** został przedstawiony silnik krokowy w swoim najprostszym wykonaniu. Rdzeń został namagnesowany w najprostszym sposób (dwa bieguny) oraz są dwa uzwojenia przesunięte względem siebie o 90° (fazy). Jeśli przez jedną z faz przepływa prąd, to powstaje pole magnetyczne. Rotor obraca się wraz ze swoim polem magnetycznym do położenia, w którym pomiędzy rotorem a fazą jest najmniejsza szczelina powietrzna oraz największy strumień magnetyczny (przeciwnie bieguny przyciągają się, a jednakowe się odpychają!).

Poprzez zmianę kierunku przepływu prądu można spowodować ustawienie się rotora w czterech różnych położeniach, przy czym jego ruchy obrotowe odpowiadać będą kolejności zmian polaryzacji. Ten tryb pracy

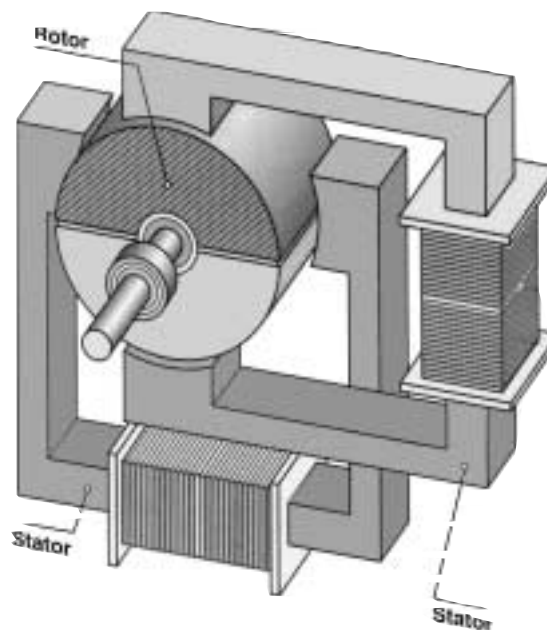
zwanym Wave-drive, został schematycznie przedstawiony na **rysunku 2a**. Inna metoda wprowadzenia w ruch silnika krokowego polega na doprowadzeniu prądu do obydwu faz w normalnym trybie pracy. W tym trybie zawsze występują dwukrotnie dwie jednakowe fazy obok siebie. Zachowanie się rotora można najłatwiej wyjaśnić na podstawie **rysunku 2b**.

Sekwencja sterująca jest to “elektryczny” obrót o 360°. Aby dokonać pełnego obrotu mechanicznego, nieodzowna jest właściwie odpowiednia sekwencja impulsów sterujących. W obydwu wymienionych przypadkach sekwencja składa się zawsze

z czterech taktów. Jest to **TRYB PRACY Z PEŁNYM KROKIEM**.

Oczywiście nic nie stoi na przeszkodzie, aby dokonać kombinacji normalnego trybu pracy i Wave-drive, uzyskując wówczas **TRYB PRACY Z KROKAMI POŁÓWKOWYMI**. Dzięki temu można zrealizować kroki połówkowe, które niejako za darmo podwajają “rozdzielczość” silnika. W takim trybie pracy prąd przepływa na zmianę przez jedno albo przez obydwa uzwojenia. W trybie pracy z krokami połówkowymi pełna sekwencja składa się z ośmiu taktów.

W zależności od sposobu wykonania uzwojeń można wyróż-

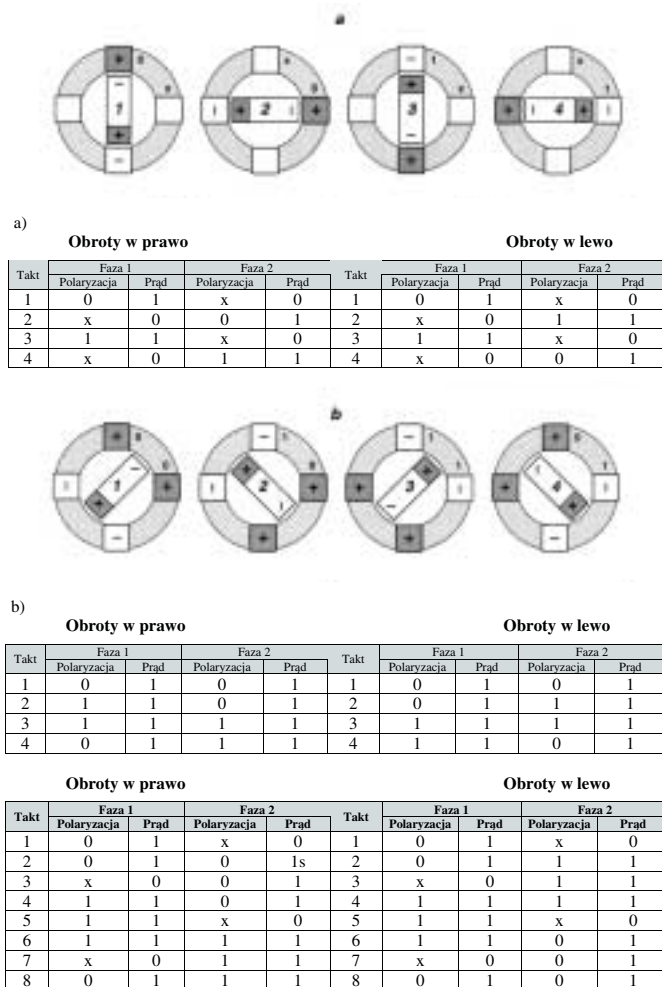


Rys. 1 Model prostego silnika krokowego z dwubiegunowym rotorem i z dwoma uzwojeniami (fazami) przesuniętymi względem siebie o 90°.

nić dwie kolejne techniki sterowania. Przy niewielkim skomplikowaniu układu (tylko jeden dodatkowy przełącznik) można wykorzystać popularny dawniej **TRYB PRACY UNIPOLARNEJ** - (rysunek 3a). Oczywiście uzwojenia te muszą posiadać wyprowadzenia w połowie swojej długości, a poza tym z powodu niewielkiego prądu w uzwojeniu

Tak więc sterowanie cewką realizowane jest przy pomocy dwóch przełączników a nie jednego.

Silniki krokowe o mniejszej liczbie faz, szczególnie przy małych szybkościach obrotowych (częstotliwościach), charakteryzowałyby się nierównomierną pracą (szarpaniem) i to także przy trybie pracy z krokiem połówkowym. Dalsze poprawienie jakości

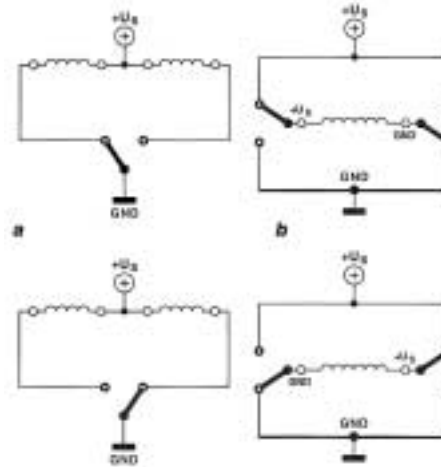


Rys. 2 Schemat doprowadzania prądu do uzwojeń przy pracy w trybie normalnym (b) i Wave-drive (a). Jeśli dokonano się połączenia (kombinacji) obydwu metod bazujących na całych krokach, to otrzyma się sterowanie metodą kroków połówkowych.

można uzyskać stosunkowo mały moment obrotowy, jak również małą szybkość obrotową.

Dopiero w momencie pojawienia się zintegrowanych i tanich układów scalonych przeznaczonych do sterowania silnikami krokowymi, coraz bardziej zaczęto wykorzystywać **BIPOLARNY TRYB PRACY** - (rysunek 3b). W technice tej uzwojenia z obydwu stron są przełączane.

pracy jest jednak możliwe, w taki sposób, że prądu nie będzie się po prostu włączać i wyłączać, lecz będzie on podwyższany lub odpowiednio obniżany w sposób stopniowy. Spokojny ruch obrotowy uzyskuje się właśnie w ten sposób - jest to **TRYB PRACY Z MIKROKROKAMI**. Oczywiście praca w trybie mikrokroków redukuje moment obrotowy i dokładność ustalenia pozycji, co w szczegól-



Rys. 3 Uzwojenia silnika do pracy w trybie unipolarnym (a) muszą posiadać wyprowadzenie w połowie długości uzwojenia. Silniki unipolarne (b) wymagają sterowania poprzez dwa przełączniki na każde uzwojenie.

ności dla silników krokowych o małej liczbie pozycji rotora jest pewną wadą.

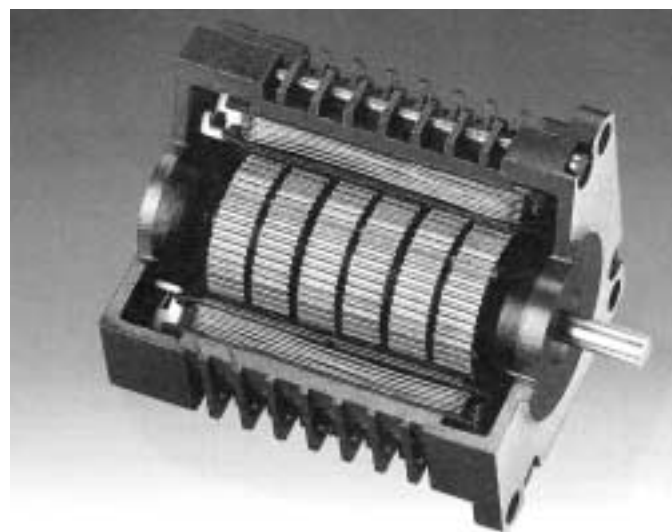
W praktyce

Do tej pory omawiany był jedynie model silnika krokowego, który... w praktyce nie występuje. W nowoczesnych, hybrydowych silnikach krokowych jako rdzenie stosowane są okrągłe płytki namagnesowane osiowo w sposób trwały. Krażki te posiadają zębate wieńce, które przesunięte są nawzajem względem siebie o połowę szerokości zęba, w taki sposób, żeby bieguny N i S się przeplatały. Na fo-

tografii 4 przedstawione jest wnętrze takiego hybrydowego silnika krokowego.

Kąt odpowiadający jednemu krokowi albo inaczej rozdzielczość silnika uzależniona jest nie tylko od liczby par biegunów, a więc od liczby zębów odpowiadających biegunom N oraz S na rotorze, ale także od liczby pojedynczo sterowanych faz. Oczywiście w praktyce ogranicza się do

silników o liczbie faz od dwóch do pięciu, aby w rozsądnych granicach utrzymać ilość wymaganego okablowania i przełączników. Jeżeli nacisk położony jest na uzyskanie możliwie dużego momentu obrotowego, to powinny zostać zastosowane dwufazowe silniki krokowe. Natomiast w sytuacjach, gdy zależy nam na szczególnie równomiernej pracy (bez szarpanię), to pod uwagę powinny zostać wzięte silniki pięciofazowe sterowane mikrokrokami. Silnik trójfazowy stanowi rozsądny kompromis pomiędzy tymi dwoma skrajnymi sytuacjami.



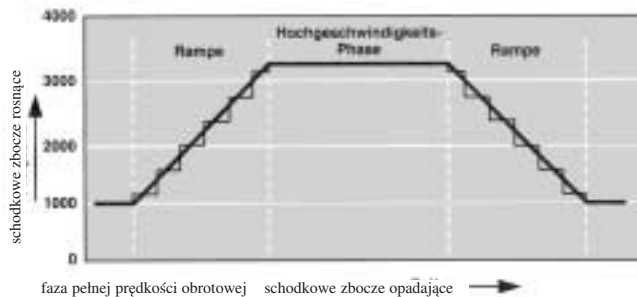
Rysunek 4. Tutaj bardzo dobrze widoczne są wieńce zębate na rotorze.

Typowo spotyka się silniki krokowe o podziale pełnego obrotu na przynajmniej 24 kroki (co 15) albo 48 kroków (co 7,5). W starszych napędach dysków stałych (HD) do dokładnego ustawienia głowicy stosowane były najczęściej silniki o 200 krokach (co 1,8) albo nawet 400 krokach (co 0,9).

A teraz ważna sprawa - po włączeniu docelowej częstotliwości taktującej, wynoszącej wiele kiloherców, silnik nie zacznie się obracać! Wcale się nie obraca, co jest spowodowane tym, że rotor ma tak dużą bezwładność, iż nie jest w stanie nadążyć za szybko przemieszczającym się polem magnetycznym statora. Start jest możliwy jedynie dzięki wykorzystaniu na początek - "częstotliwości Start/Stop", która w zależności od modelu silnika wynosi od 50Hz do 2kHz. Dopiero po takim wstępnym uruchomieniu silnika można podwyższyć częstotliwość takto-

wania. Tylko w ten sposób zapewniony jest prawidłowy rozruch (zastrzymanie) silnika. Wielkość przyspieszenia może być dowolnie mała, ale nie może być zbyt duża. Przy zbyt szybkim zwiększaniu częstotliwości taktującej rotor stanąłby w miejscu podobnie jak i wtedy, gdyby spróbowano przekroczyć maksymalną dopuszczalną częstotliwość taktowania.

Przebieg częstotliwości "Start/Stop" w trakcie procedury przyspieszania aż do prędkości docelowej przypomina rosnącą funkcję schodkową – **rysunek 5**. Wyłączanie przebiega analogicznie, lecz tym razem mamy do czynienia z opadającą funkcją schodkową, ponieważ w przypadku natychmiastowego wyłączenia rotor, ze względu na swą dużą masę, po prostu nadal by się obracał i co istotne, informacje o dokładnym położeniu byłyby stracone.



Rys. 5 Przyspieszanie i hamowanie silnika odbywa się przy wykorzystaniu funkcji schodkowej.

„Startową” częstotliwość taktowania, przy której silnik krokowy może bezpiecznie obracać się w obydwu kierunkach bez stosowania procedur na bazie funkcji schodkowej, dobiera się wyłącznie do poszukiwania punktu zerowego oraz dla najmniejszych potrzebnych prędkości obrotowych. Sterowanie przy pomocy komputera stosuje się przede wszystkim dla silników

krokowych sterowanych krokami połówkowymi oraz mikrokrokami i to zarówno dla zwykłego sterowania, jak i przy wykorzystaniu funkcji schodkowej. Jest to zadanie dla układu sterowania silnikiem krokowym, na przykład dla 80C166-Board (opracowanie Elektora) lub innego, w oparciu o mikrokontroler jednoukładowy bądź inne specjalizowane układy scalone.