

mgr inż. ŁUKASZ BĄCZEK
dr hab. inż. ZYGFRYD GŁOWACZ prof. ndzw. w AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
Katedra Maszyn Elektrycznych

Sterowanie prędkością silnika krokowego z zastosowaniem mikrokontrolera ATmega8

Zaprojektowano i wykonano sterownik silnika krokowego bipolarnego. Sterownik składa się z mikrokontrolera ATmega8, programatora, mostka typu H umożliwiającego zmianę kierunku obrotów silnika, stabilizatora napięcia, który posiada wbudowane ograniczenia: prądowe, termiczne oraz zabezpieczenie przed opuszczeniem obszaru bezpiecznej pracy, LCD – alfanumerycznego wyświetlacza. Konstrukcja sterownika pozwala na jego rozbudowę.

1. WPROWADZENIE

Silniki krokowe zalicza się do grupy silników elektrycznych, gdzie impulsowe zasilanie prądem pozwala na wykonywanie ruchu obrotowego rotora z określoną prędkością i o określony kąt [1], [2], [3]. Cechą odróżniającą omawiane silniki od innych maszyn elektrycznych jest skokowe wirowanie wektora pola magnetycznego. Wartości kąta obrotu i prędkości zależą od liczby impulsów i budowy silnika – podobnie jak maksymalna prędkość obrotowa oraz momenty obrotowy i trzymający (czyli moment przy zerowej prędkości obrotowej silnika zasilanego znamionowym napięciem). Silniki krokowe wymagają zastosowania odpowiedniego układu sterowania, który generuje impulsy powodujące dyskretny ruch obrotowy rotora. W szczególności prędkość obrotowa zależy od częstotliwości impulsów, a jej kierunek od kolejności impulsów podawanych na jego uzwojenia.

2. PODZIAŁ SILNIKÓW KROKOWYCH ZE WZGLĘDU NA SPOSÓB STEROWANIA

Silniki krokowe ze względu na sposób sterowania dzielimy na bipolarne, które posiadają 4 wyprowadzenia i unipolarne wyposażone w 5 – 6 wyprowadzeń w postaci przewodów.

Silnik bipolarny

Silnik bipolarny o dwóch fazach ma jedno uzwojenie na fazę. W celu zapewnienia zmiany pola magnetycznego w każdym z uzwojeń musi być zapewniony przepływ prądu w obu kierunkach. W silniku bipolarnym do zmiany pola magnetycznego w rdzeniu wystarcza jeden przełącznik dwupozycyjny lub dwa tranzystory włączane na przemian. Zaletą sterowania bipolarnego jest dobre wykorzystanie momentu obrotowego dzięki temu, że całe uzwojenie jest w stanie prądowym po otrzymaniu impulsu. Ogólnie rzecz biorąc, silniki bipolarne wymagają bardziej rozbudowanego układu sterowania.

Silnik unipolarny

Silnik unipolarny ma jedno uzwojenie z odczepem pośrodku. Istnieją także silniki posiadające po dwa uzwojenia na fazę. Mogą one pracować zarówno w trybie unipolarnym jak i bipolarnym. Przy sterowaniu unipolarnym jednocześnie jest włączona połowa pasma. Sterowanie unipolarne zapewnia przepływ prądu w danym uzwojeniu tylko w jednym kierunku. Zaletą wariantu unipolarnego jest prostszy układ połączeń i mniejsza liczba tranzystorów, wadą zaś to, że jednocześnie pracuje tylko połowa uzwojenia, a zatem nie wytwarza się moment obrotowy o pełnej wartości.

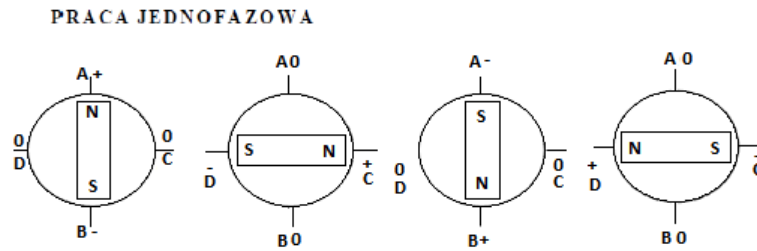
Rodzaje kroku i algorytmy komutacji

Najpowszechniejsze rodzaje sterowania to: falowe, pełnokrokowe, półkrokowe oraz mikrokrokowe.

Sterowanie falowe

W sterowaniu tym zwanym również sterowaniem jednofazowym w danym momencie zasilana jest tylko jedna faza. W przypadku silnika dwufazowego

stojan jest zasilany zgodnie z sekwencją $AB \rightarrow CD \rightarrow BA \rightarrow DC$. Wynikiem tego rodzaju sterowania jest wykonanie pełnego cyklu.

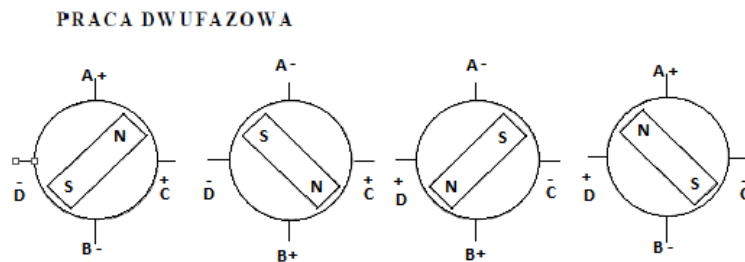


Rys. 1. Sterowanie falowe

Sterowanie pełnokrokowe

W sterowaniu dwufazowym inaczej pełnokrokowym w każdej chwili zasilane są dwie fazy. Stojan jest zasilany zgodnie z sekwencją $AB; CD \rightarrow$

$BA; CD \rightarrow BA; DC \rightarrow AB; DC$. Wynikiem tego rodzaju sterowania są takie same ruchy jak przy sterowaniu jednofazowym z tym, że pozycja wirnika jest przesunięta o pół kroku.



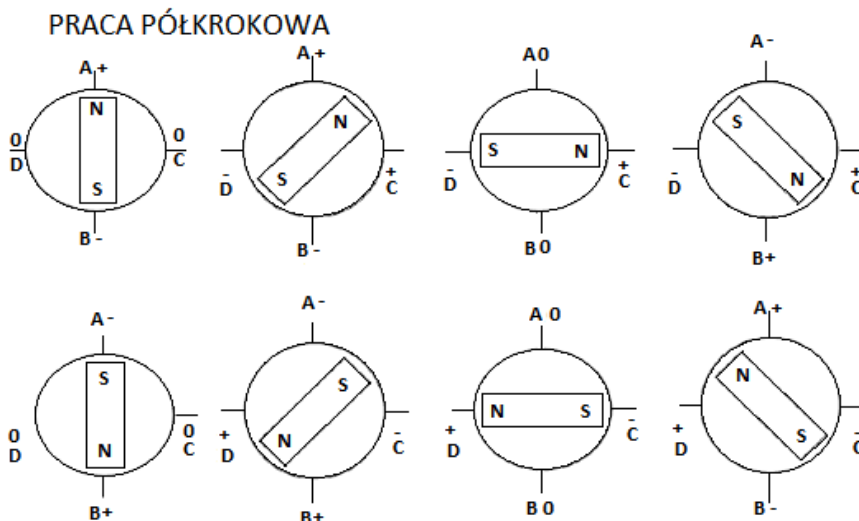
Rys. 2. Sterowanie dwufazowe

Sterowanie półkrokowe

Sterowanie półkrokowe jest kombinacją sterowania dwufazowego i jednofazowego. Co drugi krok zasilana jest tylko jedna faza, a w pozostałych krokach dwie fazy.

Stojan silnika dwufazowego jest zasilany zgodnie z poniższą sekwencją $AB \rightarrow B \rightarrow AB \rightarrow A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow$

$AB \rightarrow A$. Wynikiem tego są obroty wirnika równe połowie tych ze sterowania z jedną lub dwiema fazami włączonymi. Sterowaniem półkrokowym możemy zredukować efekt rezonansu mechanicznego, który ujawnia się w dwóch poprzednich rodzajach sterowania.



Rys. 3. Sterowanie półkrokowe

Sterowanie mikro krokowe

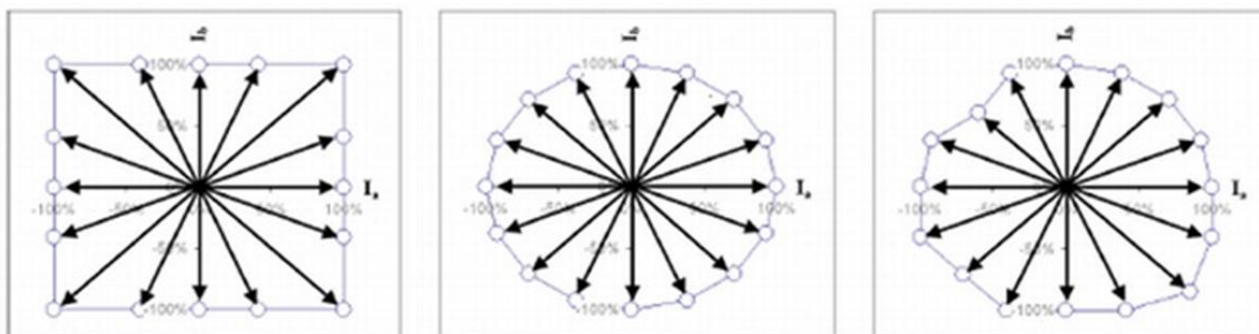
Implementacja sterowania mikro krokowego wymaga od sterownika możliwości zmiany amplitudy prądu w każdym uzwojeniu. Wyróżnia się kilka typowych metod realizacji sterowania mikro krokowego, mianowicie:

- przebieg kwadratowy – metoda ta zapewnia najwyższy chwilowy moment obrotowy. Odbywa się to jednak kosztem oscylacji wirnika.
- przebieg sinusoidalny – metoda ta polega na wymuszeniu w każdym z uzwojeń odpowiednio prze-

suniętych 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 – trudno znaleźć uzasadnienie zastosowania tej metody.

W celu opisanego powyższych algorytmów najlepiej posłużyć się przebiegami fazowymi i czasowymi prądów w uzwojeniach silnika. Bardzo dobrze oddają one ogólne idee sterowania i zwalniają z dodatkowych opisów słownych.



Rys. 4. Przebiegi fazowe przy sterowaniu mikro krokowym, kolejno od lewej: przebieg kwadratowy, przebieg sinusoidalny, przebieg arbitralny

Moment elektromagnetyczny silników krokowych

Moment elektromagnetyczny dowolnej nienasyconej maszyny elektrycznej można wyrazić jako pochodną energii elektromagnetycznej układu W_m względem kąta obrotu ϑ części ruchomej tej maszyny, w stosunku do nieruchomej osi odniesienia:

$$M_s(\vartheta) = \frac{dW_m}{d\vartheta} \quad (1)$$

Po sprowadzeniu uzwojeń silnika skokowego i ewentualnego magnesu trwałego do działania uzwojenia w postaci dwóch pasm zastępczych w stojanie i wirniku w elektromagnetycznym stanie ustalonym, energia magnetyczna układu może być wyrażona następującym wzorem:

$$W_m = W_s + W_r = \frac{1}{2}(\psi_s I_s + \psi_r I_r) \quad (2)$$

Strumienie skojarzone stojana i wirnika możemy przedstawić jako iloczyny prądów i indukcyjności uzwojeń zastępczych:

$$\psi_s = L_s(\vartheta)I_s + M_{sr}(\vartheta)I_r \quad (3)$$

$$\psi_r = L_r(\vartheta)I_r + M_{sr}(\vartheta)I_s \quad (4)$$

gdzie:

$L_s(\vartheta), L_r(\vartheta)$ – indukcyjności własne stojana i wirnika;

$M_{sr}(\vartheta)$ – indukcyjność wzajemna.

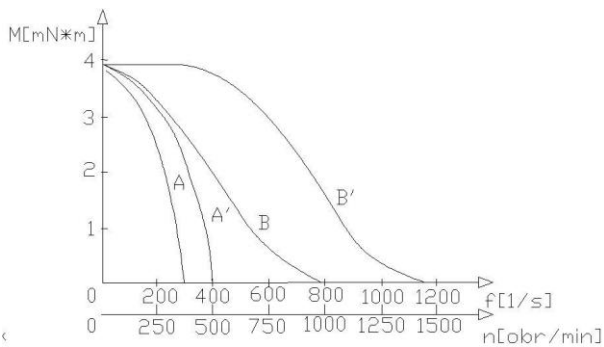
$$M_s(\vartheta) = \frac{1}{2}I_s^2 \frac{dL_s}{d\vartheta} + \frac{1}{2}I_s^2 \frac{dL_r}{d\vartheta} + I_s I_r \frac{dM_{sr}}{d\vartheta} \quad (5)$$

Dwa pierwsze człony równania przedstawiają moment reluktancyjny, który jest wynikiem modulacji pola w szczelinie wywołanej przez poruszający się wirnik. Trzeci człon równania reprezentuje moment synchroniczny wzbudzeniowy.

3. CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE

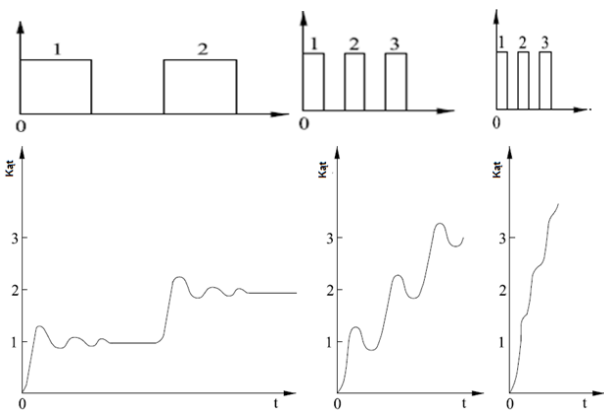
Poza podstawowymi parametrami istotną rolę odgrywają charakterystyki mechaniczne zwane częstościowymi charakterystykami momentu. Charakterystyka ta określa dobór silnika do określonych wymagań stawianych napędowi oraz ograniczenia w zakresie sterowania dla danego typu silnika.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładową charakterystykę silnika krokowego.



Rys. 5. Charakterystyka mechaniczna silnika krokowego

Przestrzeń zakreślona przez krzywą A oraz osie układu wyznacza tzw. obszar start – stopowy. Obszar ten wyznacza prędkości i obciążenia, przy których silnik pracuje synchronicznie i nie gubi impulsów. Możliwe w nim jest przejście od stanu ustalonego do stanu pracy kinematycznej w wyniku skokowego wzrostu częstotliwości impulsów sterujących. Punkt przecięcia krzywej A z osią rzędnych wyznacza maksymalny moment obciążenia jaki może występować przy rozruchu. Punkt przecięcia krzywej A z osią odciętych wyznacza maksymalną częstotliwość rozruchu nieobciążonego. Krzywa B wyznacza maksymalną wartość prędkości dla danego obciążenia, przy której może pracować silnik. Aby silnik mógł pracować w obszarze pracy wyznaczonym przez krzywe A i B należy nim odpowiednio sterować. W obszarze tym należy dostatecznie wolno i płynnie zmieniać częstotliwości impulsów sterujących. Silnik nadąża w nim za impulsami sterującymi, ale nie realizuje rozruchu, nawrotu i nie jest w stanie zatrzymać się bez wybiegu przy przerwaniu komutacji. Punkt



Rys. 6. Wykresy wielu kroków dla różnej częstotliwości impulsów sterujących

przecięcia krzywej B z osią odciętych wyznacza maksymalną częstotliwość pracy silnika. Obszar pracy między krzywymi A i B jest nazywany obszarem pracy przyspieszonej. Wyjście poza obszar określony krzywą B skutkuje wypadnięciem z synchronizmu i zatrzymaniem się silnika. Stosując odpowiednie układy zasilające można powiększyć obszary wyznaczone przez krzywe A i B do postaci obszarów, które są wyznaczone przez krzywe A' i B'.

4. ZASADA DZIAŁANIA STEROWNIKA

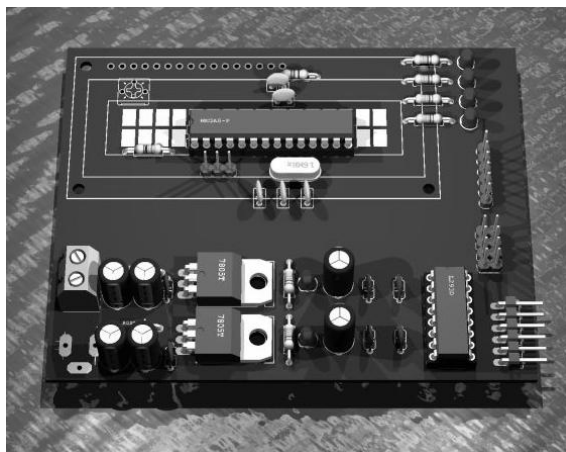
Układ jest sterowany przez odpowiednio oprogramowany mikroprocesor. Do zasilania układu wykorzystane zostały dwa oddzielnie pracujące stabilizatory napięcia ograniczające napięcie na wyjściu do 5 V. Jeden stabilizator za zadanie ma zasilić LCD i uC, a drugi (stabilizator) silnik za pomocą układu L293D, gdyż silnik generuje zniekształcenia, które mogą wpływać na pracę procesora. Cały układ został zasilony z zewnętrznego zasilacza napięciem stałym 12 V. Do L293D podano napięcie zasilania silnika oraz zasilanie logiki (wejścia Enable), służą one załączaniu i wyłączaniu mostka, dlatego podano na te wejścia 5 V, aby mostek był aktywny. Sygnały wyjściowe z mostka podłączono do zacisków silnika.

Oprogramowanie sterownika umożliwiło:

- tryb pracy automatyczny/ręczny,
- regulację prędkości silnika,
- wybór cyklu pracy silnika,
- wykonywanie pracy rewersyjnej (zmiany kierunku obrotów).

Sterownik wyposażono w:

- 4 przyciski (Góra, Dół, Prawo+, Lewo-), dzięki którym można było się poruszać po MENU, które jest ilustrowane na wyświetlaczu LCD;
- włącznik/wyłącznik zasilania;
- wyświetlacz LCD;
- diody LED sygnalizujące częstotliwość pracy silnika;
- złącze ISP do programowania układu oraz wprowadzania poprawek do jego działania;
- potencjometr do regulacji kontrastu LCD;
- 6 wyprowadzeń na złącza silnika (4 do sterowania silnikiem bipolarnym i 2 napięcia dodatnie (5 V) w celu sterowania silnikiem unipolarnym);
- złącze USART.



Rys. 7. Wyrenderowana w 3D płytka PCB mikroprocesorowego sterownika

Idea działania urządzenia wygląda następująco:
Tryb pracy<=>Kierunek obrotu<=>Prędkość

Przejścia pomiędzy Trybem pracy, Kierunkiem obrotu a Prędkością realizowane są za pomocą przycisków „Góra” i „Dół”.

Zmiana trybu pracy:

Wciskając przycisk „Lewo” zmienia się sterowanie (np. z półkroku na pełny krok), ponowne wciśnięcie przycisku „Lewo” powoduje powrót na poprzednią pozycję. Analogicznie wygląda działanie z przyciskiem „Prawo”.

Zmiana kierunku:

jeśli silnik stoi i naciskamy „Lewo”, silnik obraca się w lewo

jeśli silnik stoi i naciskamy „Prawo”, silnik obraca się w prawo

jeśli silnik obraca się w lewo i naciskamy „Lewo”, silnik kontynuuje pracę

jeśli silnik obraca się w lewo i naciskamy „Prawo”, silnik się zatrzymuje

(kolejne naciśnięcie „Prawo”, spowoduje ruch silnika w prawo)

jeśli silnik obraca się w prawo i naciskamy „Prawo”, silnik kontynuuje pracę

jeśli silnik obraca się w prawo i naciskam „Lewo”, silnik się zatrzymuje

(kolejne naciśnięcie „Lewo”, spowoduje ruch silnika w lewo)

Zmiana prędkości:

Zwiększenie częstotliwości impulsów podawanych na silnik odbywa się poprzez wciskanie klawisza ” + „,

Zmniejszenie częstotliwości impulsów podawanych na silnik odbywa się poprzez wciskanie klawisza „ - „,

Liczba w MENU Prędkość jest interpretowana jako wartość opóźnienia w ms pomiędzy poszczególnymi

krokami w sekwencji sterującej silnikiem. Zawiera się ona w przedziale od 53 do 250.

Sterowanie obrotami silnika polega na sekwencyjnym podawaniu stanu wysokiego na kolejne wyjścia portu mikrokontrolera (PD4, PD5, PD6, PD7). Sygnał ten doprowadzony do wejść układu L293D powoduje zwieranie wyjść tego układu do masy, a tym samym przepływu prądu przez kolejne uzwojenia silnika. Im szybciej będą podawane impulsy tym silnik będzie się szybciej obracał. Maksymalny prąd, jaki można uzyskać z jednego wyjścia to ok. 1 A.

Silnik sterowany w trybie półkrokowym, tzn. zasilane jest jedno uzwojenie lub dwa sąsiednie, dzięki czemu uzyskujemy dwa razy więcej stabilnych położeń niż przy sterowaniu pełnokrokowym (a tym samym płynniejszy ruch przy małych prędkościach obrotowych). Sekwencję sterującą przedstawiono w tabeli 1:

Tabela 1

Sekwencja sterująca

Krok	A1	A2	B1	B2
0	-	-	-	+
1	-	-	+	+
2	-	-	+	-
3	-	+	+	-
4	-	+	-	-
5	+	+	-	-
6	+	-	-	-
7	+	-	-	+

Oznaczenia:

+ zasilanie uzwojenia

- brak zasilania uzwojenia

0-1-2-3-4-5-6-7 → Sekwencja dla półkroku

0-2-4-6 → Sekwencja dla pełnego kroku (z wykorzystaniem zasilania jednej cewki – stabilizator mniej się nagrzewa)

1-3-5-7 → Sekwencja dla pełnego kroku (z wykorzystaniem zasilania dwóch cewek – mocniejszy silnik)

5. ELEMENTY UKŁADU

Każdy element znajdujący się w sterowniku ma wpływ na pracę sterownika. Najważniejszymi elementami elektronicznymi wśród elementów sterownika są:

- mikrokontroler ATmega8 (skrót ang. MCU lub μC) jest to system mikroprocesorowy w postaci pojedynczego układu scalonego, który zawiera jednostkę centralną CPU, pamięć RAM oraz w ogół pamięć programu i układy wejścia – wyjścia,
- programator – urządzenie, które umożliwia komunikację komputer \leftrightarrow MCU i jest wykorzystywane do programowania układu,
- mostek typu H (L293D) – układ elektroniczny umożliwiający zmianę kierunku obrotu osi silnika (DC) poprzez zmianę polaryzacji (odwrócenie) zasilania silnika,
- stabilizator napięcia (LM7805) – posiada wbudowane ograniczenia: prądowe, termiczne oraz zabezpieczenie przed opuszczeniem obszaru bezpiecznej pracy,
- LCD – alfanumeryczny wyświetlacz wyposażony w sterownik HD44780 o liczbie wyświetlanych znaków 2×16 .

6. PODSUMOWANIE

Zaprojektowano i wykonano sterownik silnika napędu dyskowego (silnika krokowego bipolarnego). Podczas realizacji projektu napotymano liczne problemy oraz nieprawidłowości, które stopniowo i sukcesywnie były eliminowane. Aby minimalizować napotymane problemy sterownik powstawał przez „stawianie małych kroków”. Mianowicie, pisany był program i montowany układ uC sterujący diodami LED, kolejno sprawdzano reakcje jednostki centralnej na przyciski, sterowanie L293D typu prawo-lewo. Kończącym etapem było uruchomienie wyświetlacza LCD i zbudowanie Menu. Wymagało to zdobycia wiedzy z dziedziny programowania w języku C, obsługi mikrokontrolera ATmega8, sterowania wyświetlaczem LCD, zasad sterowania silnikami krokowymi, rysowania schematów elektrycznych oraz lutowania i procesu wykonania płytki

PCB. Sterownik został wykonany tak, aby była możliwość jego rozbudowy (złącze USART, ISP) oraz aby był bardziej uniwersalny (poprzez wyprowadzenie dwóch dodatnich (+5 V) złączy na silnik – dla silnika krokowego unipolarnego).

Literatura

1. *Potocki L.*: Silniki krokowe od podstaw. Elektronika dla Wszystkich 2002, nr 8, s. 26-29.
2. *Potocki L.*: Silniki krokowe od podstaw. Elektronika dla Wszystkich 2002, nr 9, s. 24-26.
3. *Sochocki R.*: Mikromaszyny Elektryczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1996.

Recenzent: dr inż. Antoni Zdrojewski