

# Silniki krokowe

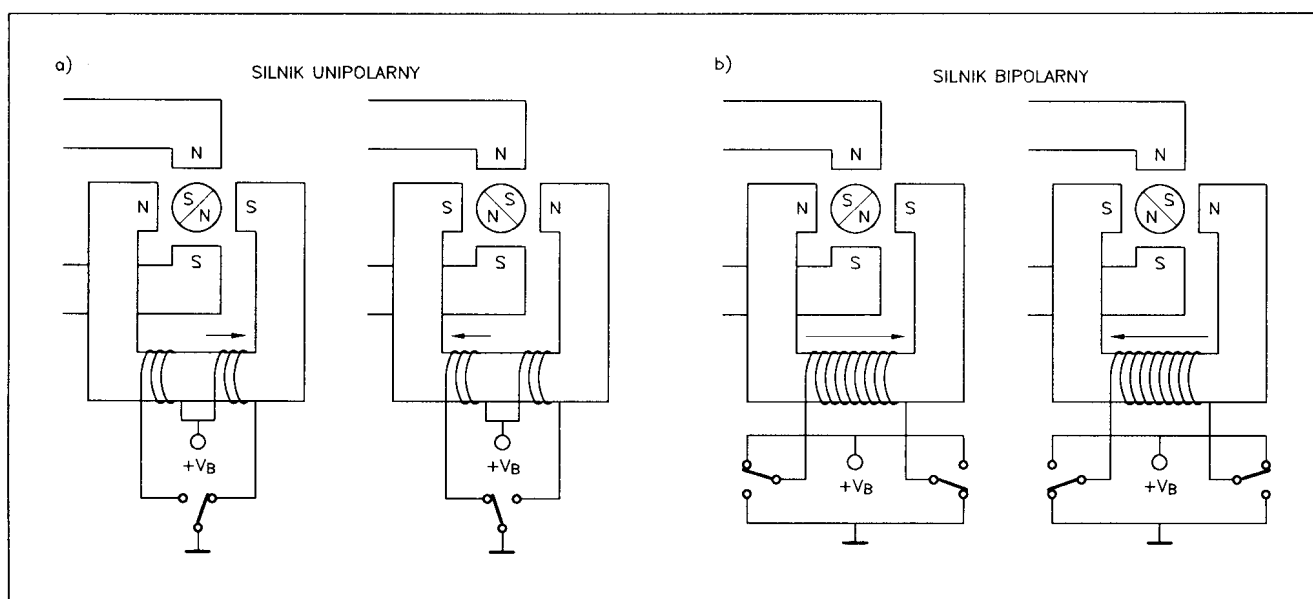
Silniki krokowe spotkać możemy w coraz większej liczbie urządzeń z którymi spotykamy się codziennie. Opanowały one napędy dysków i dyskietek w komputerach, napędy głowic i wałków w drukarkach i maszynach do pisania, przesuwanie głowic laserowych w odtwarzaczach kompaktowych, spotkać je można w robotach przemysłowych i w wielu innych miejscach. Z tego też względu warto zapoznać się z silnikami, które różnią się od klasycznych silników szczotkowych i indukcyjnych.

Silniki krokowe w jednym takcie pracy wykonują część obrotu wału wokół osi. Obrót taki nazywa się krokiem. Dla danego silnika podawana jest liczba kroków na jeden pełny obrót wału, lub kąt o jaki obróci się wał po wykonaniu jednego kroku. Liczba kroków na jeden obrót może zawierać się w szerokich granicach od kilkunastu do ponad dwustu. Cechą charakterystyczną silników krokowych jest brak komutatora, czyli mechanicznego przełącznika rozptywów prądu w silniku.

W dużym uproszczeniu można powiedzieć, że silnik krokowy składa się ze stałego magnesu zamocowanego na osi, tworzącego rotor i dwóch uzwojeń nazywanych pasmami tworzącymi stojan. Przepływ prądu przez pasma powoduje powstanie pola magnetycznego i przyciąganie magnesu w ten sposób wykonuje się obrót o pewien kąt. W zależności od konstrukcji silnika magnes na osi może mieć wiele biegunów, a dwa uzwojenia mogą być połączone w szereg sekcji. W ten sposób uzyskuje się żądaną liczbę kroków na jeden obrót.

Wśród silników krokowych można wyróżnić dwa podstawowe typy: unipolarne i bipolarne, które wymagają odmiennych układów sterowania. Silniki unipolarne (rys. 1a) posiadają dwie pary podwójnych uzwojeń (na rysunku pokazano tylko jedną parę). Koniec pierwszego uzwojenia połączony jest z początkiem drugiego i wyprowadzony na zewnątrz. Zatem silnik bipolarny posiada sześć wyprowadzeń. W niektórych rozwiązaniach uzwojenia wyprowadzone są oddzielnie wtedy silnik posiada osiem wyprowadzeń.

Ciąg dalszy w następnym numerze.



Rys. 1 Silnik krokowy: a) unipolarny, b) bipolarny

## Ciąg dalszy ze str. 2

Uzwojenia transformatora nawijane są na korpusach o przekroju prostokątnym, które najczęściej nazywane są karkasami. Najczęściej spotyka się dwa typy karkasów pojedyncze i dzielone. Pierwszy z nich stosowany jest we wszystkich typach rdzeni, a drugi tylko w rdzeniach EI, M i EE. W karkasach pojedynczych uzwojenie pierwotne nawijane jest jako pierwsze (na spodzie karkasu), a uzwojenie wtórne jako drugie. W transformatorach małych mocy można spotkać się z odwrotną kolejnością nawijania uzwojeń. Można też spotkać spe-

cialne kształtki nakładane na karkas, których celem jest zwiększenie wytrzymałości napięciowej transformatora.

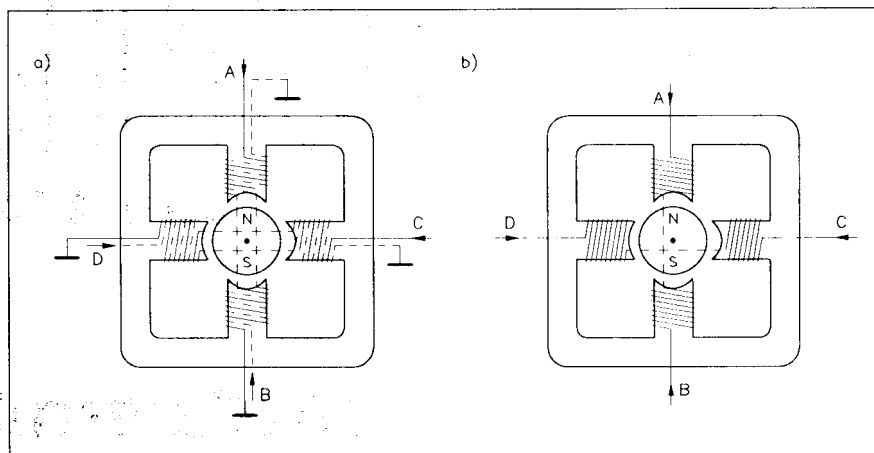
Parametrem najbardziej nas interesującym w karkasie jest powierzchnia przekroju wolnego miejsca, ponieważ chodzi tu o rozmieszczenie uzwojeń. W tabeli 1 zamieszczono parametry techniczne drutów nawojowych. Jednym z parametrów jest liczba zwojów jaka zmieści się w jednym centymetrze kwadratowym wolnego przekroju karkasu. Wartość ta obliczona jest dla równego ułożenia kolejnych zwojów. Z tego też względu przy obliczeniach liczby zwojów które zmieszczą się na karkasie wskazane jest obniżenie tej wartości o ok. 10%.

Tabela 1 Parametry techniczne drutów nawojowych

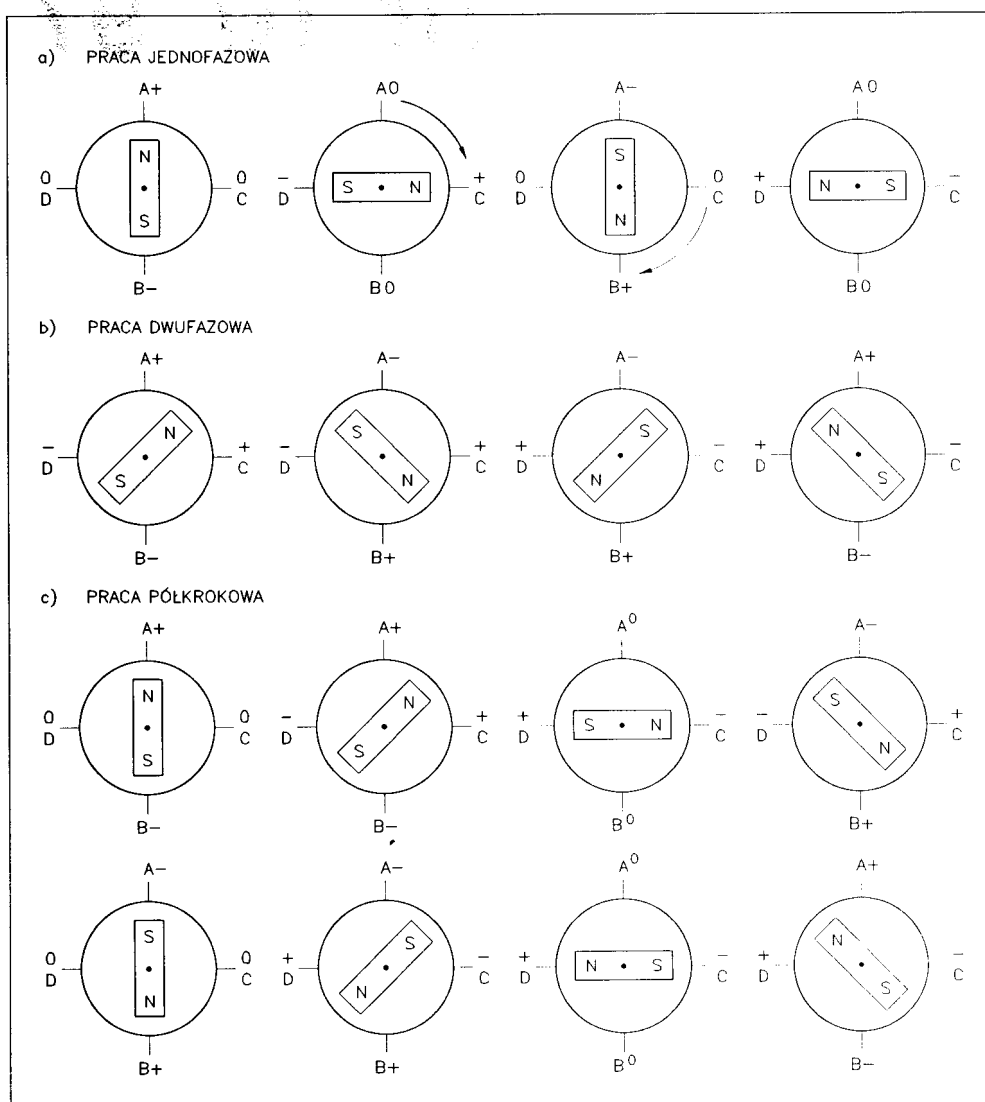
Średnica	Średnica z emalią	Przekrój	Ciężar na metr	Rezystancja na metr	Liczba zwojów na cm <sup>2</sup>	Prąd przy j=2,55 A/mm <sup>2</sup>
[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[g/m]	[Ω/m]	[zw/cm <sup>2</sup> ]	[mA]
0,05	0,062	0,0020	0,019	9,10	20.000	5
0,08	0,095	0,0050	0,048	3,55	9.000	13
0,10	0,115	0,0079	0,074	2,22	6.000	20
0,15	0,17	0,0177	0,164	0,99	2.800	45
0,20	0,22	0,0314	0,289	0,557	1.650	80

## Silniki krokowe

W silniku bipolarnym do zmiany kierunku pola magnetycznego w rdzeniu wystarcza jeden przełącznik dwupozycyjny, lub dwa tranzystory włączane na przemian. Nazwa unipolarny pochodzi od jednego kierunku przepływu prądu przez uzwojenia silnika.



Rys. 2 Budowa silnika krokowego: a) unipolarnego, b) bipolarnego



Rys. 3 Kolejne fazy ruchu silnika krokowego bipolarnego przy sterowaniu:  
a) jednofazowym, b) dwufazowym, c) półkrokowym

Silniki bipolarnie pokazane na rys. 1b, posiadają tylko dwa pojedyncze uzwojenia. Czyli silnik bipolarny posiada cztery wyprowadzenia. Można spotkać rozwiązania silników mające osiem wyprowadzeń kiedy stojan podzielony jest na dwie sekcje górną i dolną. Zmianę kierunku pola magnetycznego uzyskuje się przez zmianę kierunku przepływu prądu w uzwojeniu. Niezbędne do tego są dwa przełączniki bistabilne, lub cztery tranzystory połączone w mostek. Podobnie jak poprzednio nazwa silnika pochodzi dwukierunkowego przepływu prądu przez uzwojenia.

Ogólnie rzecz biorąc silniki bipolarnie wymagają bardziej rozbudowanego układu sterowania. Problem ten został jednak rozwiązany w chwili pojawienia się specjalizowanych scalonych układów mocy zawierających dwa kompletne mostki tranzystorowe mogące kluczować znaczne prądy.

Zaletą silników bipolarnych jest możliwość uzyskania większego momentu obrotowego niż w silnikach unipolarnych o tych samych wymiarach. Dzieje się to za sprawą zastosowania pojedynczego uzwojenia, które może być wykonane drutem o większej średnicy, a zarazem mniejszej rezystancji. Automatycznie pozwala to na zwiększenie prądu płynącego przez uzwojenie przy zachowaniu tych samych strat mocy na rezystancji.

Ciąg dalszy na str. 30

## Ciąg dalszy tekstu ze str. 2

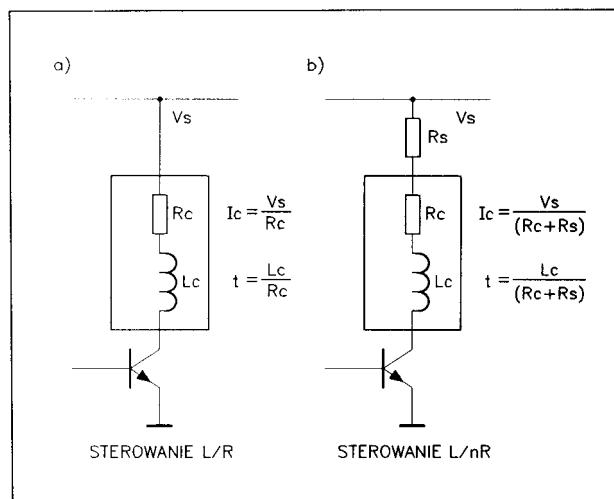
Dzięki temu silnik bipolarny posiada o 40% większy moment obrotowy od silnika unipolarnego zbudowanego na tej samej ramce.

W dużym uproszczeniu konstrukcję silnika unipolarnego i bipolarnego, dwufazowego ze stałym magnesem przedstawiono na rysunku 2. Składa się ona ze stałego magnesu będącego rotorem i stojana otaczającego rotor wykonanego z blach o specjalnym kształcie na których nawinięte są uzwojenia. W dalszym ciągu będziemy rozpatrywać zasadę pracy i sterowania silnika bipolarnego (zasada pracy silnika unipolarnego jest identyczna, choć sterowanie wygląda trochę inaczej).

Silniki krokowe mogą być sterowane na trzy sposoby. Pierwszym z nich jest sterowanie jednofazowe. Oznacza to, że w danej chwili prąd przepływa tylko przez jedno uzwojenie. Jeżeli sekwencja sterująca będzie miała postać: AB/CD/BA/DC, to silnik będzie obracał się w prawo (AB oznacza kierunek przepływu prądu od zacisku A do B). Zilustrowano to w uproszczeniu na rysunku 3a. Dla każdej zmiany kierunku prądu silnik wykonuje jeden krok. W naszym przykładzie daje to cztery kroki na pełen obrót.

Drugim sposobem sterowania jest praca dwufazowa przy której prąd zawsze płynie w obu uzwojeniach (rys. 3b). Zasilanie równoczesne obu uzwojeń po-

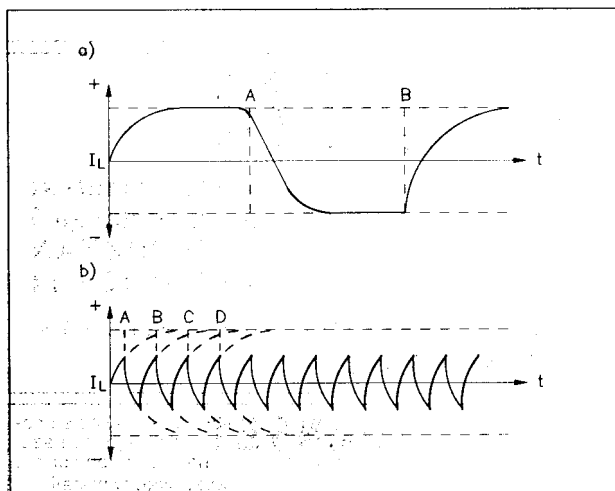
woduje ustawianie się magnesu na ukos w stosunku do nabiegunków stojanu. Sekwencja sterująca ma postać: AB,CD/CD,BA/BA,DC/DC,AB. Podobnie jak poprzednio silnik wykonuje cztery kroki na jeden obrót. Równoczesne zasilanie obu uzwojeń silnika powoduje wzrost momentu obrotowego w stosunku do pracy jednofazowej. Ten rodzaj pracy jest najczęściej stosowanym sposobem sterowania silnikami bipolarnymi.



Rys. 4 Sterowanie napięciowe silnikiem krokowym:  
 a) sterowanie L/R, b) sterowanie L/nR

Trzeci rodzaj sterowania pozwala na pracę półkrokową (rys. 3b), która łączy ze sobą cechy obu poprzednich metod sterowania. W tym przypadku silnik wykona osiem kroków na jeden obrót, a właściwie osiem połówek kroku podstawowego, zatrzymując się naprzeciwko nabiegunków i pośrodku pomiędzy nabiegunkami. Sekwencja sterująca jest w tym przypadku najbardziej skomplikowana i ma postać: AB/AB,CD/CD/CD,BA/BA/BA,DC/DC/DC,AB. W pracy półkrokowej moment obrotowy jaki uzyskuje się na wale silnika jest porównywalny z momentem obrotowym silnika przy sterowaniu jednofazowym.

Po zaznajomieniu Czytelników ze sposobami sterowania silnikami krokowymi czas przejść do układów sterujących. Uzwojenie silnika krokowego charakteryzowane jest trzema podstawowymi parametrami: rezystancją, indukcyjnością i prądem znamionowym (czasami napięciem znamionowym, które jest powiązane z prądem i rezystancją za pomocą klasycznego prawa Ohma). W zakresie niewielkich prędkości obrotowych wystarczające jest klasyczne sterowanie napięciowe, przy którym wartość prądu znamionowego wynika z rezystancji uzwojenia  $I_c = V_s/R_c$ . Taki sposób sterowania oznacza się często jako "sterowanie L/R" został pokazany na rysunku 4a. Tranzystor bipolarny pełni tu rolę klucza włączającego napięcie.

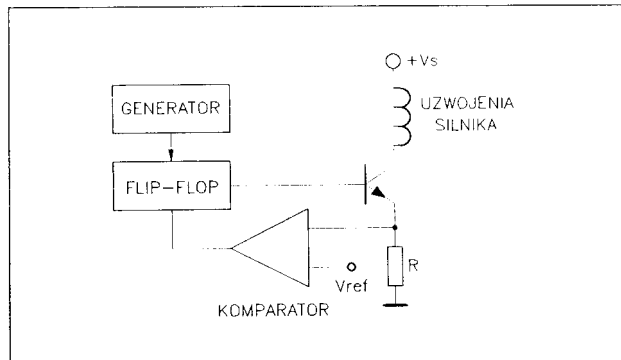


Rys. 5 Przebieg prądu w uzwojeniu silnika w funkcji czasu:

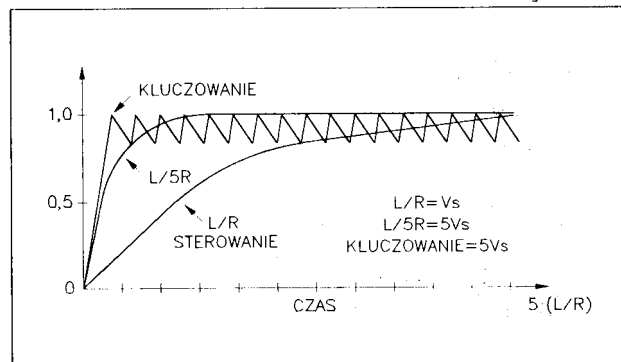
- a) przy małych prędkościach obrotowych,
- b) przy dużych prędkościach obrotowych

Z uwagi na indukcyjność prąd w uzwojeniu silnika narasta w określonym czasie  $t = L_c/R_c$  (rys. 5a). Przy wyższych prędkościach obrotowych prąd uzwojenia nie zdąży osiągnąć wartości znamionowej w czasie trwania jednego kroku (rys. 5b linia ciągła). Powoduje to zmniejszenie momentu obrotowego. Najprostszym rozwiązaniem jest podwyższenie napięcia zasilającego silnik i umieszczenie szeregowo z uzwojeniem dodatkowego rezystora  $R_s$  (rys. 4b). Suma rezystancji uzwojenia i  $R_s$  jest tak dobrana aby przy podwyższonym napięciu otrzymać prąd znamionowy (rys. 5b linia przerywana). Czas narostu prądu zwiększa się odwrotnie proporcjonalnie do wartości rezystora  $R_s$ . Ten sposób sterowania

jest często nazywany jako "sterowanie L/nR", gdzie "n" określa wielokrotność wartości rezystora szeregowego w stosunku do rezystancji uzwojenia. Zasadniczą wadą tego rozwiązania są znaczne straty mocy w rezystorze szeregowym. Z tego też względu ten sposób sterowania nie jest stosowany w praktyce.



Rys. 6 Schemat układu czoperowego



Rys. 7 Porównanie czasu narostu prądu w uzwojeniu silnika dla różnych rodzajów sterowania

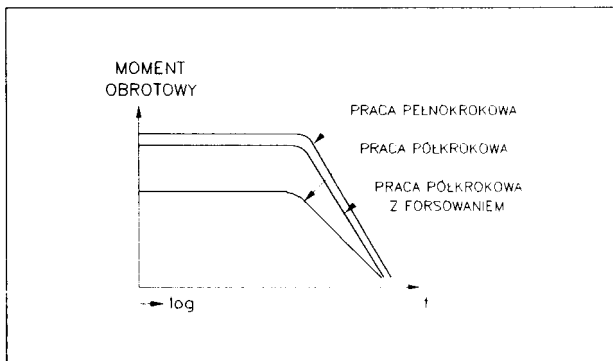
Chcąc uniknąć strat w rezystorze szeregowym stosuje się kluczowane sterowanie prądowe. Schemat układu czoperowego realizującego sterowanie prądowe pokazano na rysunku 6. Tranzystor T spełnia tu rolę klucza, a rezystor  $R$  o niewielkiej wartości umożliwia pomiar prądu płynącego przez uzwojenie.

Po włączeniu tranzystora sterowanego z przerzutnika prąd w uzwojeniu zaczyna narastać. Wraz ze wzrostem prądu na rezystorze  $R$  wzrasta napięcie. Po przekroczeniu wartości napięcia  $U_{ref}$  doprowadzonego do komparatora przerzutnik zmienia swój stan blokując tranzystor. Ponowne włączenie tranzystora jest możliwe po zmianie stanu przerzutnika sterowanego przez niezależny generator. W ten sposób prąd płynący przez uzwojenie osiąga stosunkowo szybko wartość nominalną, a później jest kluczowany utrzymując się na stałym poziomie. Dodatkową zaletą tego rozwiązania jest możliwość regulacji prądu płynącego przez uzwojenie przy pomocy napięcia stałego doprowadzanego do wejścia komparatora. Im wyższe jest napięcie  $U_{ref}$  tym większy prąd będzie płynął przez uzwojenie silnika. Na rysunku 7 przedstawiono porównanie czasu narostu prądu w uzwojeniu silnika dla różnych sposobów sterowania.

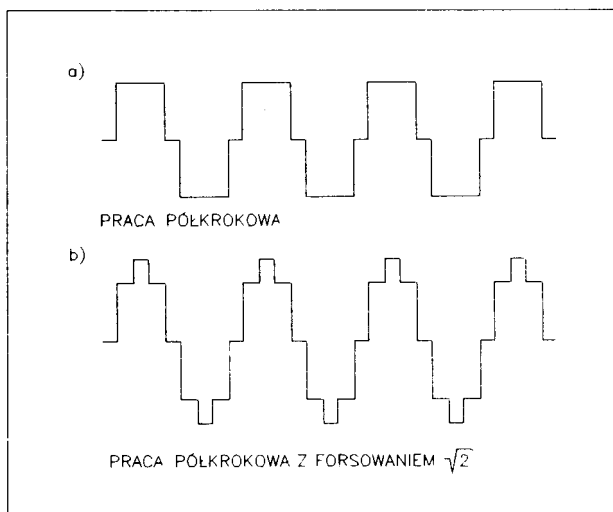
ciąg dalszy w następnym numerze.

## Silniki krokowe – dokończenie

W poprzednich częściach opisano rodzaje pracy silnika krokowego. Jednym z rodzajów była praca półkrokowa, czyli taka w której silnik wykonuje dwa razy więcej kroków niż posiada par biegunów. Ten rodzaj pracy posiada jednak kilka istotnych wad do których można zaliczyć zmniejszenie się momentu obrotowego. Na rysunku 8 przedstawiono porównanie momentu obrotowego dla pracy pełnokrokowej i półkrokowej. Z wykresu widać wyraźnie, że przy pracy półkrokowej moment obrotowy jest mniejszy o ok. 40%.



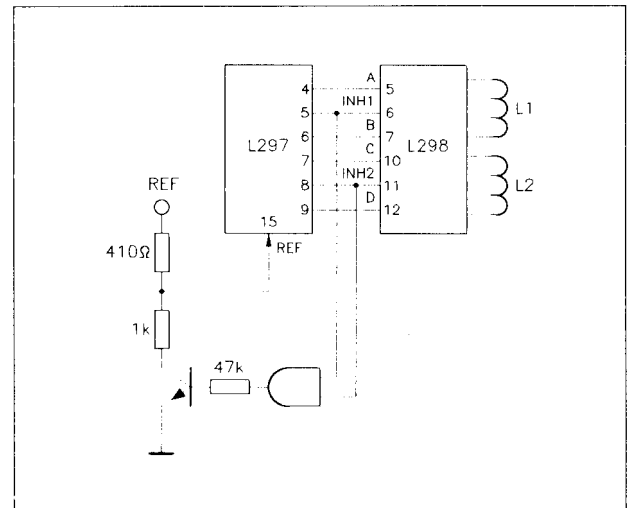
Rys. 8 Porównanie wielkości momentu obrotowego w zależności od sposobu sterowania w funkcji częstotliwości przebiegów zegarowych



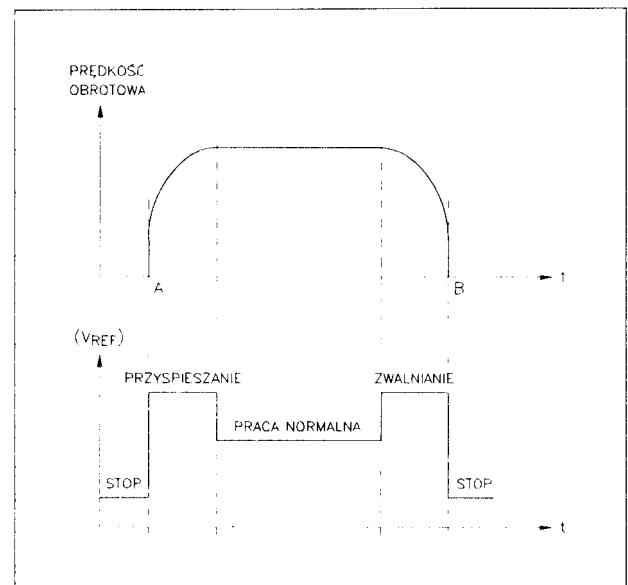
Rys. 9 Przebiegi prądu w uzwojeniu silnika krokowego przy pracy: a) półkrokowej, b) półkrokowej z forsowaniem

Możliwe jest jednak sterowanie półkrokowe silnika z tzw. forsowaniem, że spadek momentu obrotowego jest niewielki i nie przekracza 5%. Idea sterowania półkrokowego przedstawiona została na rysunku 9. Polega ona na zwiększeniu wartości prądu w uzwojeniach silnika o wartość pierwiastka z 2. Co ciekawe nie pociąga to za sobą przekroczenia mocy strat w silniku, która

podawana jest zawsze dla pracy pełnokrokowej dwufazowej kiedy to praktycznie przez cały czas prąd przepływa przez oba uzwojenia. Zwiększenie wartości przepływu prądu w jednym uzwojeniu następuje tylko w czasie kiedy w drugim uzwojeniu nie płynie prąd. Dlatego też maksymalna moc strat nie zostanie przekroczona.



Rys. 10 Schemat ideowy układu sterowania półkrokowego z forsowaniem



Rys. 11 Przebieg napięcia referencyjnego podczas rozruchu, pracy i zatrzymania silnika krokowego

Realizacja sterowania z forsowaniem jest bardzo prosta w przypadku sterowania z kluczkowaniem. Przykład takiego układu dla scalonych sterowników silników krokowych L 297 i L 298 przedstawiono na rysunku 10.

Ciąg dalszy na str. 30

## Ciąg dalszy ze str. 2

Pojawienie się stanów wysokich na wyjściach INH1 i INH2 równocześnie powoduje włączenie tranzystora T i podanie na wejście REF układu L 297 napięcia referencyjnego obniżonego przez dzielnik napięcia. W trakcie forsowania silnika tranzystor T zostanie zatknięty i napięcie referencyjne na wejściu układu L 297 wzrośnie, co pociągnie za sobą wzrost prądu silnika.

Zmiana napięcia referencyjnego, oraz co z tym związane zmiana prądu płynącego przez silnik może zostać wykorzystana do zaoszczędzenia energii elektrycz-

nej. Silnik w czasie rozruchu wymaga większego prądu niż w czasie pracy ze stałą prędkością obrotową, podobnie jest w przypadku hamowania. Każdy silnik posiada pewną maksymalną częstotliwość zegara przy której może on ruszyć z miejsca, oraz może zatrzymać się natychmiast bez gubienia kroku. Natomiast po ruszeniu można zwiększyć częstotliwość zegara i silnik będzie pracował prawidłowo. Podobnie przed zatrzymaniem prędkość obrotową można zredukować płynnie i dopiero wtedy zatrzymać silnik gwałtownie.

◇ mgr inż. Dariusz Cichoński