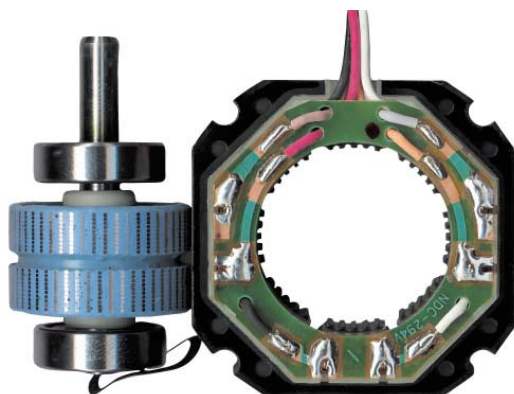


Silniki krokowe od podstaw



Część 1 - dla niecierpliwych praktyków

Większe i mniejsze silniki krokowe są obecnie bardzo często wykorzystywane w rozmaitych urządzeniach. Jednocześnie dla bardzo wielu zarówno zrozumienie zasady działania tych silników, jak i sposobu ich sterowania wydaje się wyjątkowo trudne. Utwierdza w takim przekonaniu dziwna budowa oraz obecność kilku, zwykle 4...8 wyprowadzeń. Budowa popularnego silnika pokazana jest na **fotografii 1** i **fotografii tytułowej**. Na domiar złego istnieje kilka typów silników krokowych, kilka sposobów sterowania, a w poszczególnych źródłach stosuje się odmienną terminologię. Stosowane nazwy i określenia straszą początkujących. Oto przykłady: silniki reluktancyjne, hybrydowe, bifilarne, unifilarne, bipolarnie, unipolarnie; sterowanie pełnokrokowe, półkrokowe, mikrokrokowe, jednofazowe, dwufazowe, itp.



Fot. 1

Jeśli ktoś się nie da zdeprymować i zajmie tymi pożytecznymi elementami, szybko się przekona, że całe zagadnienie wcale nie jest

trudne. Silniki krokowe to miłe i wdzięczne stworzenia, które można sterować z wykorzystaniem bardzo prostych sposobów. Jedynie osoby, które chcą „wycisnąć” z tych silników absolutnie wszystko, co się tylko da, powinny włączyć się w temat, poznać zaawansowane zagadnienia sterowania mikrokrokowego, złożone sterowniki i specyficzne sposoby sterowania.

Aby łagodnie wprowadzić w temat zupełnie niezorientowanego Czytelnika, w tym artykule zaczniemy od najpopularniejszych silników i ich sterowania, a dopiero potem przejdziemy do pokazania szerszego obrazu zagadnienia.

Silniki krokowe, zwane też skokowymi, przekształcają impulsy elektryczne w ruchy mechaniczne. Każdy impuls podany na uzwojenia silnika powoduje obrót wirnika o niewielki kąt. Czym większa częstotliwość impulsów sterujących, tym szybciej obraca się wirnik. Kierunek obrotów zależy od sekwencji impulsów zasilających uzwojenia. Ponieważ pojedynczy skok wirnika w większości silników krokowych jest mały, około 0,72...3,6 stopnia, podając odpowiednią liczbę impulsów można precyzyjnie ustawić wirnik w potrzebnym położeniu. Choć maksymalna prędkość obrotowa nie jest imponująca (rzędu kilku, kilkunastu obrotów na sekundę), silniki takie mają szereg zalet. Znakomicie sprawdzają się tam, gdzie potrzebny jest kontrolowany ruch. Dużą zaletą silników krokowych jest możliwość pracy z bardzo małymi prędkościami obrotowymi, przy czym silnik dysponuje cały czas swym pełnym momen-

tem obrotowym. Dzięki temu zastępują stosowane wcześniej klasyczne silniki z przekładnią i kosztowne serwo mechanizmy. Jedną z najbardziej znaczących zalet jest możliwość pracy w pętli otwartej. Praca w pętli otwartej oznacza, że nie potrzeba sprzężenia zwrotnego i informacji o aktualnym położeniu wirnika. Nie potrzeba kosztownych elementów sprzężenia zwrotnego, takich jak enkodery optoelektroniczne czy inne czujniki. Aktualna pozycja wirnika wyznaczona jest przez liczbę podanych impulsów.

Silniki krokowe nie mają szczotek, komutatora ani innych elementów, gdzie występuje znaczne tarcie, więc są bardzo trwałe. Ich trwałość wyznaczona jest przez żywotność łożysk. Dają się bardzo precyzyjnie sterować. Częstotliwość impulsów sterujących wyznacza prędkość obrotową. Każdy impuls obraca wirnik o ściśle określony, niewielki kąt, więc przemieszczenie wirnika i napędzanych elementów dokładnie odpowiada liczbie impulsów sterujących. Silniki krokowe zdobyły ogromną popularność, co nie znaczy, że są najlepsze ze wszystkich silników. Do niektórych zastosowań w ogóle się nie nadają, bo na przykład nie mogą pracować przy dużej prędkości obrotowej.

Silnik

O różnorodności rynkowej oferty w zakresie silników krokowych może świadczyć choćby strona internetowa poważnego dystrybutora, na przykład poznańskiej firmy Wobit: www.wobit.com.pl

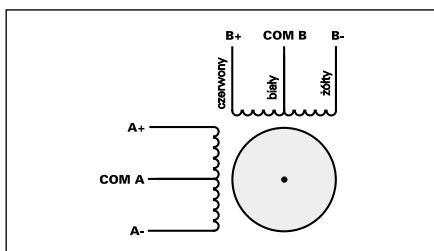
Generalnie silniki krokowe są dość kosztowne, dlatego hobbyści rzadko korzystają z bogatej oferty rynkowej. Z reguły wykorzystują silniki z odzysku, najczęściej ze starych

drukarek. Właśnie taki silnik pokazany jest na fotografii wstępnej. **Fotografia 2** pokazuje dwa podobne „drukarkowe” silniki. Nie mając żadnych danych technicznych takiego silnika z odzysku należy przede wszystkim ustalić typ i układ wyprowadzeń, natomiast maksymalną moc można ocenić w czasie prób praktycznych na podstawie temperatury obudowy. Moc typowych silników tego typu wynosi 1...20W, zależnie od rozmiarów.



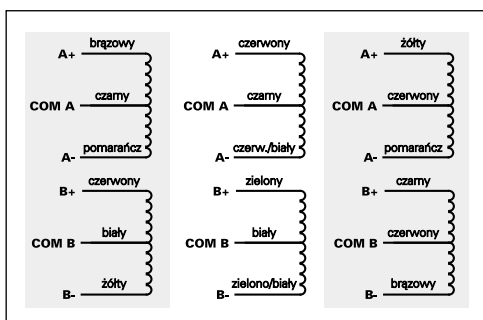
Fot. 2

Najpopularniejsze silniki krokowe mają cztery uzwojenia, a właściwie dwie pary uzwojeń. Początkującym czasem przestrasza fakt, że liczba wyprowadzeń silnika bywa różna. Nie należy się tym przejmować, tylko trzeba sprawdzić zwyczajnym omomierzem, jak są połączone te uzwojenia. Omomierz od daje nieocenione usługi podczas identyfikacji uzwojeń, przy czym ich oporność wskazuje z grubsza moc silnika. Bardzo często silnik ma sześć wyprowadzeń, a układ połączeń wygląda jak na **rysunku 1**. Identyfikacja końcówek za pomocą omomierza jest wtedy banalnie prosta. W publikacjach często podaje się stosowane kolory przewodów, ale kolory te



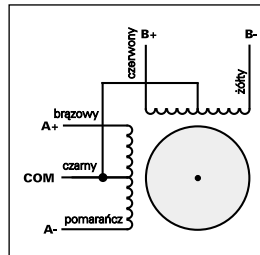
Rys. 1

Rys. 2



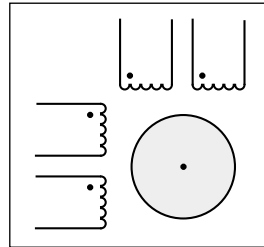
w silnikach różnych producentów są inne – kilka przykładów zamieszczono na **rysunku 2**.

W niektórych silnikach wyprowadzonych przewodów jest tylko pięć, a układ połączeń wygląda, jak na **rysunku 3**. Łatwo wtedy z pomocą omomierza określić przewód wspólny, ale nie sposób określić, które dwa uzwojenia tworzą parę. Nie jest to dużym utrudnieniem – ostatecznej identyfikacji można łatwo dokonać po dołączeniu silnika do (prostego) sterownika, zamieniając końcówki uzwojeń.

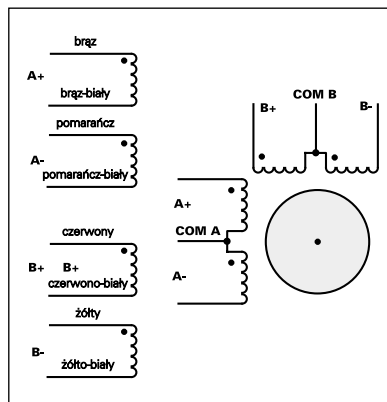


Rys. 3

Rys. 4



Rzadko zdarza się, że silnik ma aż osiem wyprowadzeń według **rysunku 4**. Pozwała wtedy zrealizować wymyślne sposoby sterowania, ale przy najprostszym sposobie trzeba je połączyć, by tworzyły dwie pary uzwojeń, jak na rysunkach 1 i 3. Na pierwszy rzut oka może to być trudne, ale wtedy powinny pomóc kolory przewodów. Chodzi o to, by nie tylko odnaleźć pary uzwojeń, ale też zachować odpowiednią fazę – dlatego na **rysunku 4** kropkami oznaczono początki uzwojeń. Pomocą przy łączeniu może być **rysunek 5** z przykładowymi kolorami przewodów.



Rys. 5

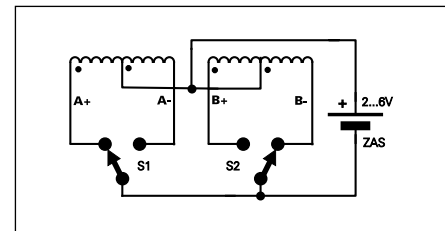
Nie musisz wiedzieć, które przewody są „początkami” oznaczonymi A+, B+, a które „końcami” oznaczonymi A-, B-. Zidentyfikuj tylko prawidłowo pary uzwojeń i ich „środk” oznaczone COM

A, COM B. Zamiana miejscami A+ i A- (albo B+ z B-) zmienia tylko kierunek wirowania.

Powyższe wskazówki dotyczą najczęściej spotykanych silników czterouzwojeniowych. Jeżeli posiadany przez Ciebie silnik ma trzy uzwojenia, albo jeszcze inny układ uzwojeń (na przykład silniki krokowe z napędów starych dyskietek 5,25 cala), trzeba dla niego zastosować odmienne sposoby sterowania – zagadnienia te będą omówione w przyszłości. Ten artykuł dotyczy tylko najpopularniejszych silników z dwoma parami uzwojeń.

Sterowanie

Podstawowe zasady sterowania tych najpopularniejszych silników z czterema uzwojeniami są bardzo proste. Najprostszym układem pokazany jest na **rysunku 6**. Każda para uzwojeń jest sterowana przez klucz-przełącznik. Schemat ten ilustruje **ważną zasadę sterowania: w danym momencie nie mogą być zasilane oba uzwojenia z jednej pary**. Przełączniki są przełączane na przemian, przez co uzyskuje się potrzebną prędkość i kierunek obrotu.



Rys. 6

Czytelnicy, którzy nigdy nie mieli do czynienia z silnikami krokowymi, powinni zbudować najprostszemu ręczny sterownik według **rysunku 6** i wypróbować jego działanie. Należy zacząć od niskich napięć zasilania, np. 2...3V i ewentualnie zwiększyć je tak, żeby w czasie takich testów silnik nie był gorący, a co najwyżej ciepły. Zasilacz powinien mieć odpowiednią wydajność – rezystancja uzwojeń silnika może być rzędu kilku omów, więc należy liczyć się z prądami 0,5...1A. Mały silnik ze starej drukarki, pokazany na fotografii wstępnej, ma rezystancję jednego uzwojenia równą 5Ω.

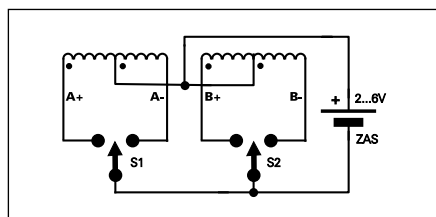
Warto założyć na wałek silnika jakąkolwiek „wskazówkę”, by łatwiej zaobserwować ruch wirnika, a następnie dociec, jaka sekwencja ustawień powoduje obrót w jednym i w drugim kierunku.

Doświadczenie takie pokazuje ostatecznie, że silniki krokowe można nazwać „silnikami cyfrowymi”, ponieważ ich prędkość obrotowa i kierunek ruchu nie zależą od wartości napięcia, tylko od kolejności dołączania zasilania do poszczególnych uzwojeń. Zupełnie niezorientowani zdziwią się przy takich eksperymentach, że przy przełączaniu wirnik wykonuje tylko mały ruch, a do uzyskania jednego pełnego obrotu wirnika trzeba przełączyć przełączniki od kilkudziesięciu do kilkuset

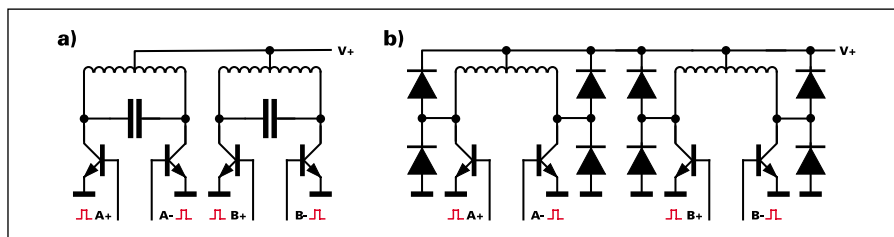
razy (zależnie od typu i budowy silnika). Już to sugeruje, że silniki krokowe nie mogą pracować z dużą prędkością obrotową. Nawet przy zastosowaniu szybkich przełączników elektronicznych maksymalna prędkość obrotowa typowego silnika krokowego sięga co najwyżej kilku obrotów na sekundę, czyli kilkuset obrotów na minutę. Przy większych prędkościach silnik szybko traci moc. Dają też o sobie znać rezonanse mechaniczne i elektryczne, dlatego dużej prędkości nie da się tu uzyskać - silnik niejako się „zadusi”.

Układ z przełącznikami z rysunku 6 pozwala zrealizować tylko jeden ze sposobów sterowania, bo w danej chwili zawsze zasilane są dwa z czterech uzwojeń. Sposób z przełącznikami trzypozycyjnymi według **rysunku 7** daje więcej możliwości: w danej chwili

Rys. 7



może być zasilane dwa, jedno lub żadne z czterech uzwojeń. Także i tu nigdy nie są zasilane oba uzwojenia z jednej pary, co jest



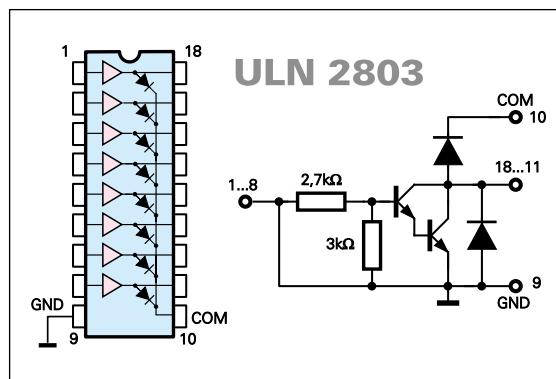
Rys. 8

żelazną zasadą sterowania silników omawianego rodzaju.

Kto ma dwa takie trzypozycyjne przełączniki, może przeprowadzić stosowne eksperymenty.

W praktyce zamiast przełączników mechanicznych, do sterowania silników krokowych stosuje się tranzystory. Tranzystor, bipolarny czy MOSFET pełni tu rolę przełącznika: jest albo zatknięty, albo całkowicie otwarty. Wobec tego do sterowania można wykorzystać sekwencję impulsów wytwarzaną przez układy cyfrowe albo mikroprocesor. Warto pamiętać, że przełączaniu ulegają

Rys. 9

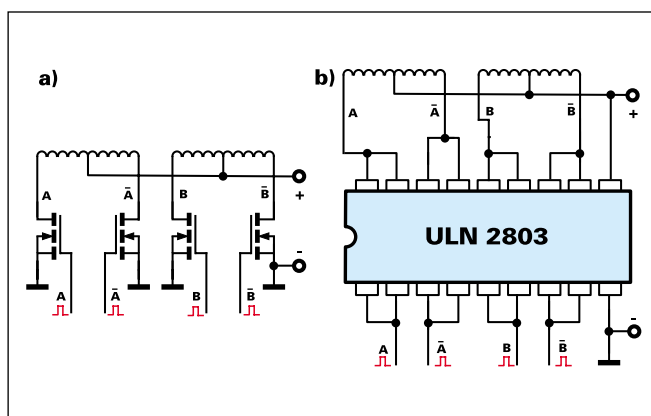


uzwojenia, mające jakąś indukcyjność. Podczas przerywania prądu w indukcyjności wytwarza się napięcie samoindukcji, które może mieć bardzo dużą wartość. Dlatego stosując tranzystory należy dodać elementy chroniące przed przepięciami. Mogą to być dobrane kondensatory według **rysunku 8a**, ale częściej stosuje się diody według **rysunku 8b**. „Górne” diody włączone są analogicznie, jak w przypadku przekąźników. Obcinają one dodatnie szpilki, powstające w chwili wyłącza-

nia prądu w „swoich” cewkach. „Dolne” diody są potrzebne, bo dwa uzwojenia jednej pary są ze sobą sprzężone i tworzą autotransformator. Gdy w uzwojeniu, gdzie zanika prąd, powstaje dodatnie przepięcie likwidowane przez „górną” diodę, w drugim uzwojeniu z danej pary powstaje wtedy impuls ujemny, obcinany przez diodę „dolną”.

Amatorzy stosując tranzystory mocy MOSFET często pomijają takie diody i okazuje się, że duże MOSFET-y nie ulegają uszkodzeniu ze względu na swe specyficzne cechy i zdolność do przeciążeń. W przypadku tranzystorów bipolarnych diody takie (przynajmniej diody „górne”) należy stosować. Powinny to być diody szybkie, a nie zwykłe diody prostownicze. W przypadku mniejszych silników warto wykorzystać popularny układ scalony ULN2803, który ma w sobie osiem tranzystorów Darlingtona o prądzie maksymalnym 0,5A i osiem diod zabezpieczających.

Rys. 10



Układ wyprowadzeń i budowa układu ULN2803 pokazane są na **rysunku 9**. Kanały można łączyć równolegle, uzyskując sterownik o prądzie do 1A, jak pokazuje **rysunek 10a**. Taki układ wykonawczy można śmiało stosować w przypadku małych silników krokowych. Jeśli prąd przekracza 1A, należy zastosować cztery MOSFET-y, np. BUZ10, IRF530 według **rysunku 10b**.

Na cztery wejścia sterujące należy podać odpowiednią sekwencję stanów logicznych.

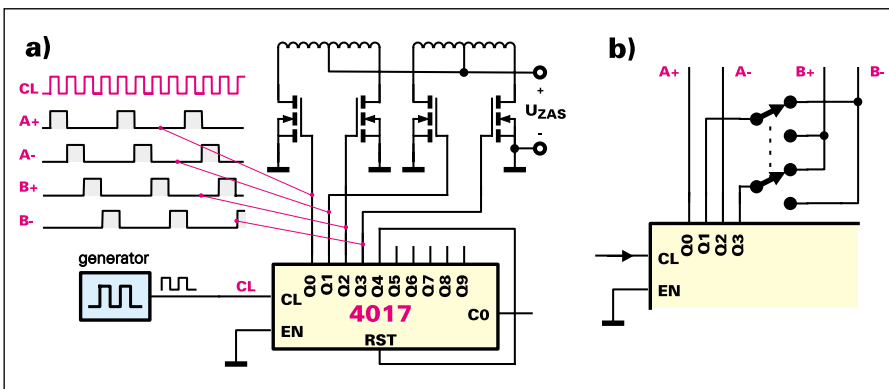
Rysunek 11a pokazuje przebiegi i przykład realizacji najprostszego sposobu: w danej chwili zasilane jest tylko jedno z czterech uzwojeń. Sekwencja sterująca A+ B+ A- B- powtarza się co cztery impulsy generatora taktującego. Taki sposób nazywany jest *sterowaniem falowym lub jednofazowym*.

obroty w prawo				
liczba dwójkowa				dziesiętne
A+	B+	A-	B-	
0	1	1	0	6
1	1	0	0	12
1	0	0	1	9
0	0	1	1	3
0	1	1	0	6
1	1	0	0	12
1	0	0	1	9
0	0	1	1	3
0	1	1	0	6
i tak dalej				

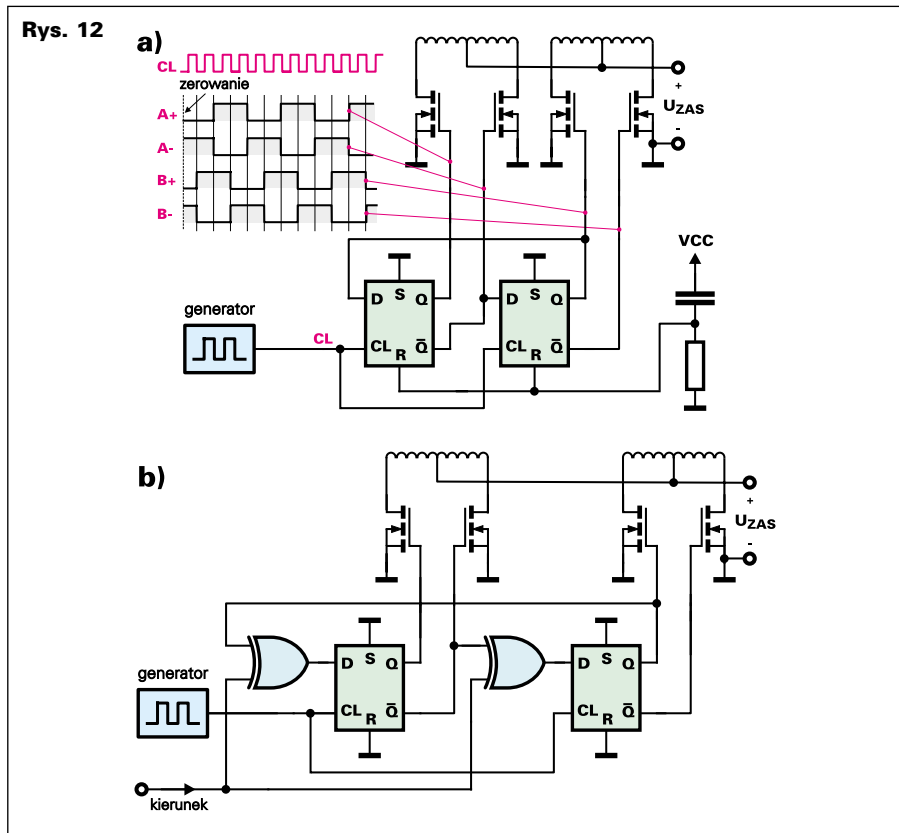
obroty w lewo				
liczba dwójkowa				dziesiętne
A+	B+	A-	B-	
0	0	1	1	3
1	0	0	1	9
1	1	0	0	12
0	1	1	0	6
0	0	1	1	3
1	0	0	1	9
1	1	0	0	12
0	1	1	0	6
0	0	1	1	3
i tak dalej				

Tabela 1

Rys. 11



Rys. 12



„Rozdzielaczem” impulsów może być rejestr przesuwany, a w tym wypadku jest nim licznik 4017 pracujący w skróconym cyklu.

A tak na marginesie: w taki najprostszy sposób można też sterować stare silniki krokowe z napędów dyskiety, które mają 3...5 uzwojeń.

Kierunek obrotów silnika z dwoma parami uzwojeń możesz zmienić w różny sposób, najprościej chyba będzie zamienić miejscami końcówki dwóch uzwojeń jednej z par, za pomocą przełącznika albo przekaźnika K według **rysunku 11b**. Sposób sterowania według **rysunku 11** nie jest zalecany, bo przy wysterowaniu w danej chwili tylko jednego uzwojenia możliwości silnika są wykorzystane w niewielkim stopniu. Dużo częściej stosuje się sposób, w którym zawsze pracują dwa z czterech uzwojeń. **Rysunek 12a** pokazuje przebiegi i przykład realizacji *sterowa-*

nia dwufazowego. Ten bardzo prosty sposób możesz wykorzystywać w praktyce. Przebiegi A+ i B+ są przesunięte względem siebie, a przebiegi A-, B- są zanegowanymi sygnałami A+, B+. Przebiegi takie łatwo wytworzyć z pomocą np. układu scalonego 4013 zawierającego dwa przerzutniki D, przy czym obwód zerowania nie jest potrzebny – na rysunku pojawił się tylko w celach edukacyjnych. Kierunek obrotów można zmieniać dodając dwie bramki EX-OR lub EX-NOR (kostki 4030, 4077) według **rysunku 12b**. W sterowniku można wykorzystać dowolny generator przebiegu prostokątnego. Jego częstotliwość określi prędkość obracania wirnika.

W roli sterownika można też wykorzystywać mikroprocesor. Wtedy cztery przewody z sygnałami sterującymi A+, B+, A-, B- potraktujemy jako szynę, na którą będą wysyłane kolejno cztery (czterobitowe) liczby dwójkowe. Można wysłać liczby według **tabeli 1**, zgodnie z **rysunkiem 12a**, przy czym określenia obroty w lewo i obroty w prawo są umowne.

Przy pierwszych próbach z nieznanym silnikiem częstotliwość taktująca nie powinna być większa, niż 50Hz. Spodziewana prędkość obrotowa wyniesie wtedy 0,25...1obr/sek, zależnie od silnika. Jeśli silnik nie ruszy, tylko będzie lekko drgać, będzie to wskaźnikiem, że źle podłączyłeś przewody i zasilasz jednocześnie dwa uzwojenia z jednej pary. Przełączając końcówki silnika w takim układzie pracy możesz zidentyfikować pary uzwojeń w silniku pięcioprzewodowym według **rysunku 3**. Jeśli silnik zacznie poprawnie pracować, można

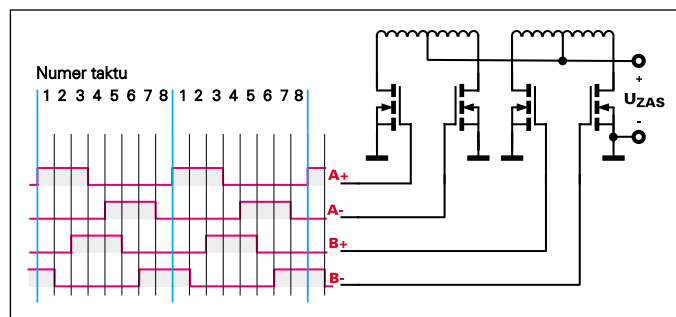
zwiększyć częstotliwość generatora, ewentualnie zwiększyć napięcie zasilania i sprawdzić maksymalną prędkość obrotową danego silnika oraz jego moment obrotowy. Nie spodziewaj się cudów – silniki krokowe przeznaczone są do pracy przy małych i znikomo małych prędkościach obrotowych, a ich moc jest niewielka. Jeden obrót na sekundę to już dla takiego silnika sporo. W przypadku silników z odzysku, niewiadomego pochodzenia, trudno precyzyjnie określić ich napięcie pracy i moc. Napięcie pracy można dobrać samodzielnie na podstawie temperatury obudowy silnika w czasie pracy. Silnik jako urządzenie elektromechaniczne jest dość odporny na wzrost temperatury. Maksymalne napięcie zasilania można zwiększać dopóty, dopóki temperatura obudowy nie wzrośnie do +80...90°C. Czyli w czasie pracy silnik może być tak gorący, że nie będzie można dotknąć go ręką. W praktyce takie sposoby szacowania możliwości silnika są wystarczające. Warto tylko pamiętać, że przy tak określonej mocy maksymalnej, prądy pracy mogą sięgnąć kilku amperów i należy stosować wtedy cztery MOSFET-y mocy (np. BUZ10, BUZ11, IRF530, IRF540), a nie układ ULN2803.

Kroki i półkroki

Sposoby według rysunków 11 i 12 zapewniają tak zwane **sterowanie pełnokrokowe**. Układy według rysunku 12 bywają stosowane w praktyce. Częściej wykorzystywany jest jednak nieco inny sposób nazywany **sterowaniem półkrokowym**. Przy sterowaniu półkrokowym jednocześnie zasilane jest albo jedno, albo dwa uzwojenia. Mówimy też wtedy o

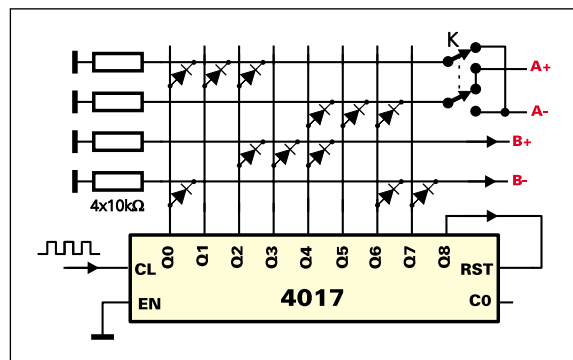
sterowaniu pośrednim między jedno- i dwufazowym. O ile przy sterowaniu pełnokrokowym sekwencja sterująca powtarza się co cztery impulsy generatora taktującego, przy sterowaniu półkrokowym - co osiem impulsów. **Rysunek 13** wskazuje, że sekwencja przy sterowaniu półkrokowym jest niejako połączeniem obu sekwencji pełnokrokowych według rysunków 11 i 12. Sprawdź, że i tu nigdy nie są zasilane jednocześnie dwa uzwojenia z jednej pary. Choć w pewnych chwilach zasilane jest tylko jedno uzwojenie, a więc uzyskiwany moment obrotowy jest nieco mniejszy, niż w układzie z rysunku 12, sterowanie półkrokowe ma swoje zalety, m. in.: silnik przy (stosunkowo) wysokich obrotach ma znacznie mniejszą skłonność do rezonansów i można uzyskać mniejszy skok elementarny (właśnie pół kroku), co w niektórych zastosowaniach jest bardzo pożądane.

W przebiegach sterujących łatwo zauważyć pewną regularność – zawsze mamy impuls o czasie trzech taktów i przerwę o długości pięciu taktów. W praktyce wytworzenie czterech takich przesuniętych przebiegów nie jest już takie łatwe, jak przy sterowaniu pełnokrokowym według rysunku 12.



Rys. 13

Rys. 14



Dlatego w najprostszyc systemach stosuje się często sterowanie półkrokowe według rysunku 13 realizuje się najczęściej przy wykorzystaniu mikroprocesora. Można też wykorzystać względnie prosty sposób z kostką 4017 (4022) i siecią 12 diod i przełącznikami kierunku K według **rysunku 14**, ewentualnie inny układ z wykorzystaniem rejestrów przesuwnych.

Przy zastosowaniu mikroprocesora traktuje się cztery linie sterujące jako szynę czterobitową, na którą podawane są odpowiednie liczby dwójkowe. **Tabela 2** pokazuje przykładową sekwencję sterującą wysyланą na cztery młodsze bity portu procesora. Zmiana kierunku wi-

rowania polega tu na odwróceniu kolejności impulsów w sekwencji sterującej, co w przypadku programu mikroprocesorowego jest łatwe do zrealizowania.

numer taktu	liczba dwójkowa				dziesiętne	pracujące uzwojenia
	A+ Px.3	B+ Px.2	A- Px.1	B- Px.0		
1	1	0	0	0	9	dwa
2	1	0	0	0	8	jedno
3	1	0	1	0	10	dwa
4	0	0	1	0	2	jedno
5	0	1	1	0	6	dwa
6	0	1	0	0	4	jedno
7	0	1	0	1	5	dwa
8	0	0	0	1	1	jedno
1	1	0	0	1	9	dwa
2	1	0	0	0	8	jedno
3	1	0	1	0	10	dwa
4	0	0	1	0	2	jedno
5	0	1	1	0	6	dwa
6	0	1	0	0	4	jedno
7	0	1	0	1	5	dwa
8	0	0	0	1	1	jedno
1	1	0	0	1	9	dwa

Tabela 2

Podsumowanie

Podane informacje wskazują, że silników krokowych w żadnym wypadku nie trzeba się bać. Mogą być z powodzeniem sterowane w prosty sposób, a potrzebne sterowniki wykona nawet mało doświadczony elektronik. Warto też nawet dla czystej ciekawości „dotknąć” tego tematu – zdobycie czterouzwojeniowego silnika krokowego, pochodzącego ze starej drukarki czy innego urządzenia nie powinno być problemem, a wykonanie opisanych układów i eksperymentów da dużo radości.

Chętni, którzy zechcą zagłębić temat silników krokowych i sposobów sterowania znajdą wiele cennego materiału w kolejnych częściach artykułu, które niebawem ukażą się w EdW.

Leszek Potocki