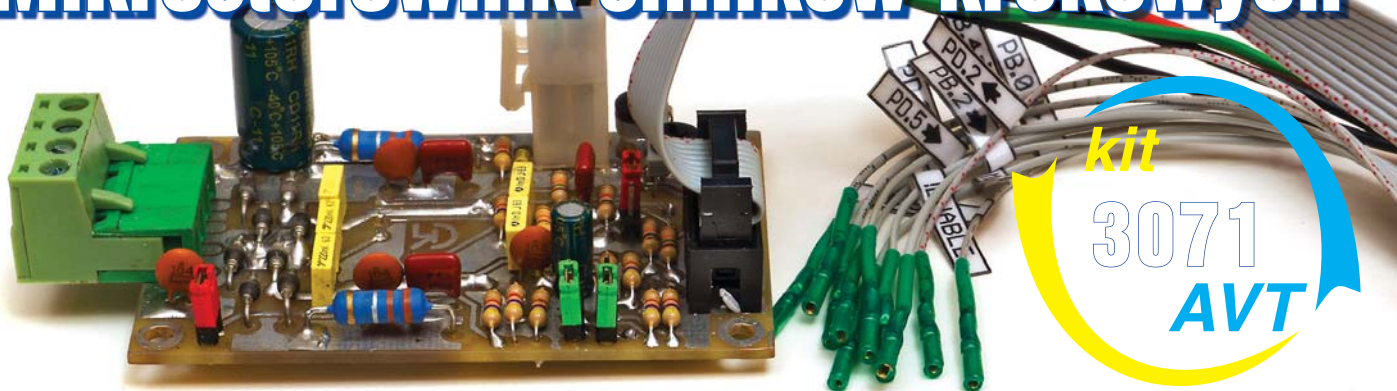




Mikrosterownik silników krokowych



kit
3071
AVT

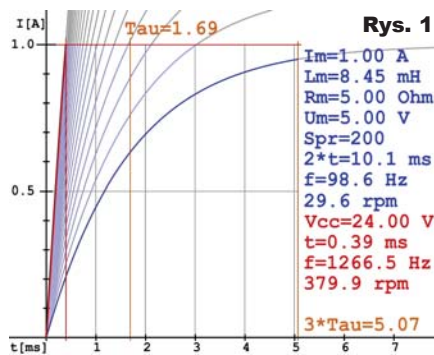
Wielozadaniowy, elastycznie konfigurowalny, mikrokrokowy sterownik bipolarnych silników krokowych. Znajdzie zastosowanie w prostych i w zaawansowanych aplikacjach napędów wykorzystujących silniki krokowe. Od zasuwania żaluzji do skomplikowanych układów pozycjonowania...

Sterowanie silnikiem krokowym za pomocą mikrokontrolera może wydawać się proste. Jednak po głębszej analizie okazuje się, że zadanie nie jest takie proste, a stopień komplikacji programu i wymagania „szybkościowe” rosną „proporcjonalnie” do liczby sterowanych silników i „kwadratowo” do podziału kroku na mikro kroki. Znacznym ułatwieniem jest zastosowanie specjalizowanego układu scalonego. Wykorzystana w układzie kostka A3977 zawiera w sobie sekwencer (translator) oraz sterownik mocy, co odciąża system mikroprocesorowy.

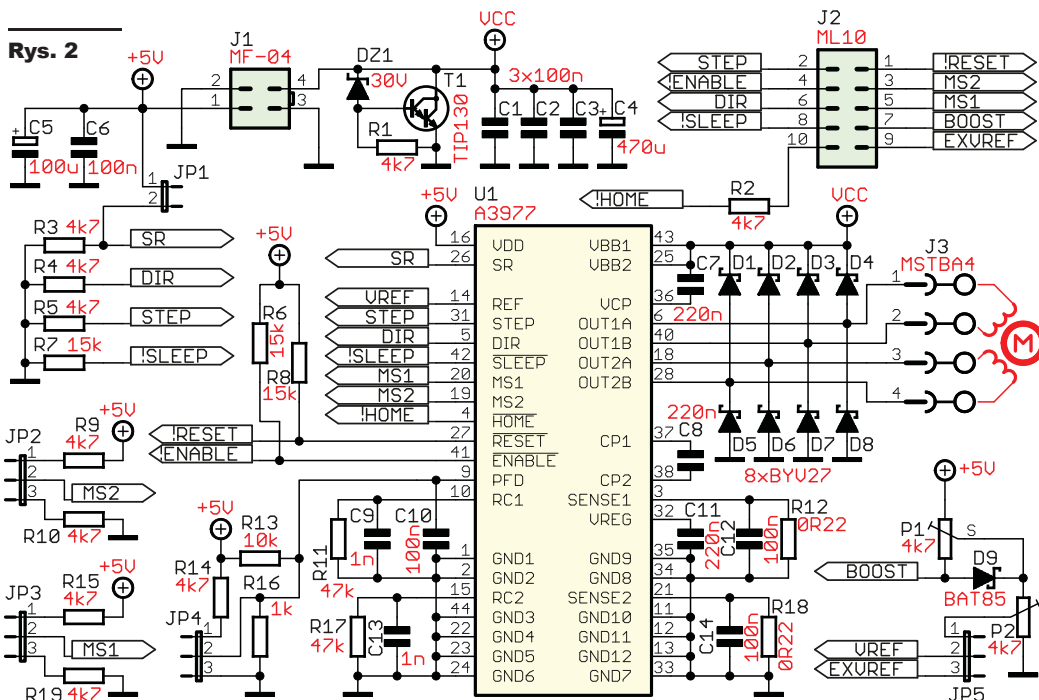
Wykorzystanie wszystkich dostępnych wejść sterujących i jednego wyjścia informacyjnego umożliwia realizację dość skomplikowanych aplikacji sterowania silnikami krokowymi, jak np. sterowniki CNC. Oprócz zadawania kroków i kierunku obrotów można konfigurować podział kroku, sterować wartością prądu w uzwojeniach silnika (prąd roboczy/trzymania) czy wprowadzać sterownik w stan zmniejszonego poboru energii. W najprostszym przypadku wystarczą dwie linie mikrokontrolera, aby sterować jednym silnikiem (krok, kierunek). Wtedy konfiguracja sterownika dokonywana jest za pomocą jumperów. Sterownik umożliwia sterowanie silnikiem bipolarnym dwufazowym i maksymalnym prądem do 2A na fazę.

Opis układu

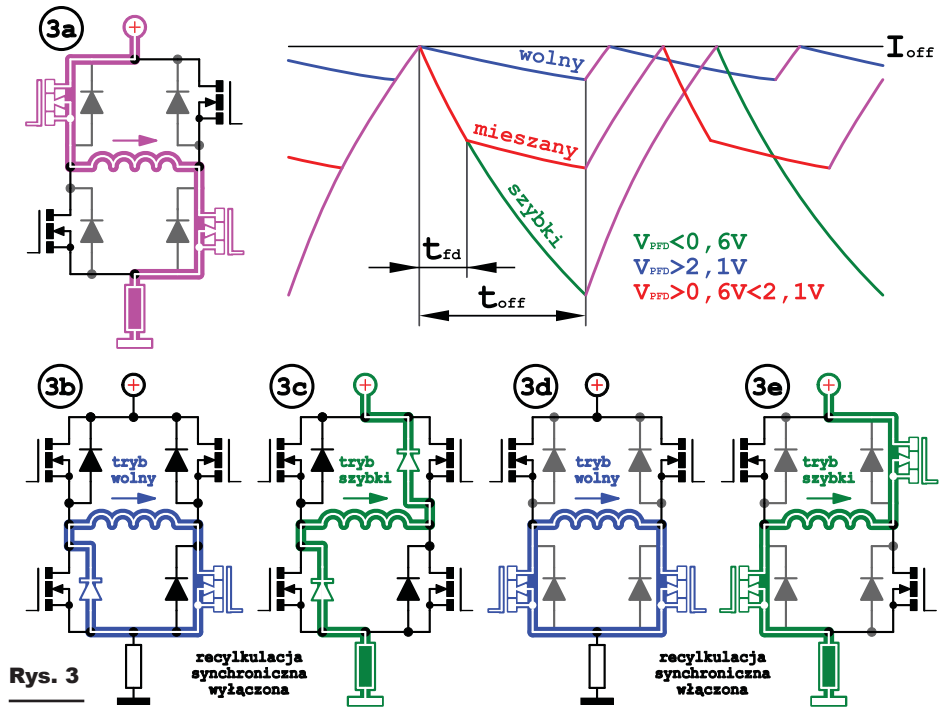
Silnik krokowy ma następujące parametry: prąd roboczy uzwojenia $[I_m]$, indukcyjność uzwojenia $[L_m]$, rezystancja uzwojenia $[R_m]$. Niekiedy podawana jest wartość napięcia roboczego uzwojenia $[U_m]$. Gdy nie podano ostatniego parametru, to można go wyliczyć ze wzoru: $U_m[V] = I_m[A] * R_m[\Omega]$. Parametry silnika wyznaczają stałą czasową oznaczaną grecką literą tau: $\tau[s] = L_m[H] / R_m[\Omega]$, która decyduje o dynamice. Po dołączeniu napięcia do uzwojenia prąd w uzwojeniu narasta według krzywej, którą opisuje wzór: $I[A] = U_r[V] / R_m[\Omega] * (1 - e^{-t/\tau})$, gdzie e jest stałą Nepera ($\approx 2,7183$), U_r wartością napięcia przyłożonego do uzwojenia, a t jest wartością czasu. Przyjmuje się, że dla przyłożonego do uzwojenia napięcia roboczego $U_r = U_m$, prąd I osiąga około 95% wartości I_m w uzwojeniu po czasie $[t = 3 * \tau]$. Zakładając jednakowe czasy narastania i zaniku prądu, można wyznaczyć maksymalną częstotliwość, z jaką może następować zmiana kroku bez utra-



ty momentu obrotowego $f[Hz] = 1 / (t[s] * 2)$. Znacząc liczbę kroków na jeden obrót wału silnika, można wyliczyć maksymalną prędkość obrotową silnika. Aby uprościć obliczenia, na Elportalu udostępniony jest skrypt dla programu renderującego POV-Ray kreślący wykres narastania prądu i obliczający wymagane parametry. Efekt pracy skryptu dla przykładowych parametrów silnika widać na rysunku 1. Zasilając uzwojenie napięciem V_{CC} (U_r) większym od napięcia roboczego U_m uzwojenia, można znacznie poprawić dynamikę napę-



du, tj. zwiększyć maksymalną prędkość obrotową (oczywiście dochodzi jeszcze sprawa rezonansów mechanicznych, ale to odrębny temat). Schemat ideowy będący rozszerzoną aplikacją z noty producenta układu przedstawiono na **rysunku 2**. Rozszerzenie polega na zastosowaniu rezystorów podciągających wejścia układu A3977 do szyn zasilania, dodaniu zwór konfiguracyjnych oraz zabezpieczenia nadnapięciowego. Wartość prądu w uzwojeniu silnika kontrolowana jest w typowy dla tego typu sterowników sposób, przez tzw. chopperowanie. Aby regulacja „działała” poprawnie, napięcie zasilające „widziane” przez uzwojenie powinno być większe od napięcia roboczego U_m współpracującego silnika. Prąd w uzwojeniu narasta według reguł wyżej opisanych, zwiększając spadek napięcia na rezystorach R12 (R18), który jest porównywany z napięciem na wejściu REF i gdy osiągnie zadaną wartość, komparator wyłącza tranzystory mocy na określony przez R11, C9 (R17, C13) czas $t_{off}[s]=R_t[\Omega]*C_t[F]$, przez który prąd uzwojenia stopniowo zanika. Po upływie tego czasu prąd w uzwojeniu jest włączany i cykl się powtarza – **rysunek 3a**. Wartość boczników wyznacza wzór: $R_s[\Omega]=0.5/I_{max}[A]$, gdzie I_{max} jest wartością prądu I_m fazy silnika. Ponieważ napięcie przed komparacją z wejścia REF jest wzmacniane (8x) wartość prądu uzwojenia, przy którym komparator wyłącza tranzystory mostka mocy, wyznacza wzór: $I_{off}[A]=V_{ref}[V]*8*R_s[\Omega]$, gdzie V_{ref} jest wartością napięcia na wejściu REF. Wartość napięcia na wejściu PFD(9) wyznacza jeden z trzech możliwych trybów sterowania zanikiem prądu, które ilustruje **rysunek 3**. Gdy napięcie PFD jest większe od 2,1V włączony jest tryb „wolnego opadania” – **rysunek 3b i 3d**. U1 reguluje szybkość zanikania prądu załączaniem odpowiednich tranzystorów wyjściowych po osiągnięciu prądu I_{off} w uzwojeniu. Zaletą tego trybu są niskie tętnienia prądu a wadą jest zniekształcony przebieg prądu (dla sekwencji), przez co zmniejsza się maksymalna osiągalna prędkość obrotowa silnika. Gdy napięcie jest mniejsze od 0,6V, układ pracuje w trybie „szybkiego opadania” – **rysunek 3c i 3e**. Przebieg prądu jest zdecydowanie mniej zniekształcony (dla sekwencji), co poprawia dynamikę napędu

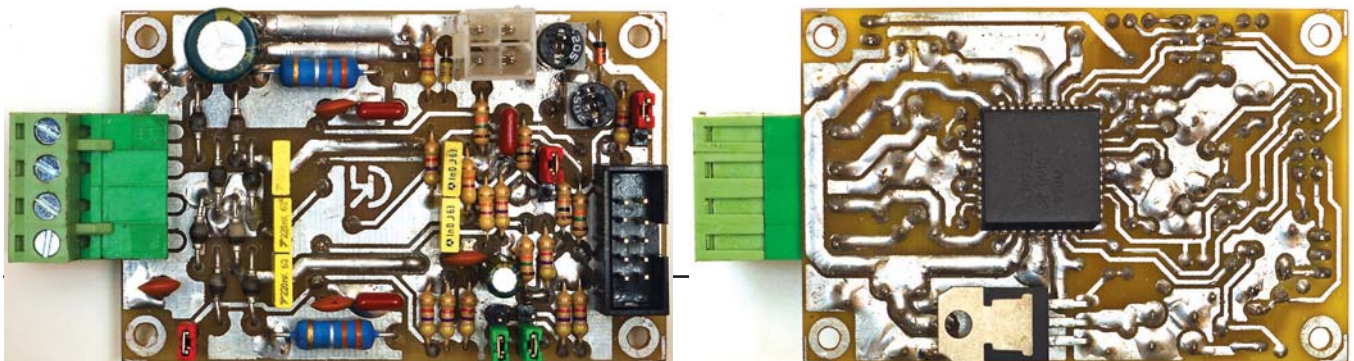


Rys. 3

kosztem większych strat ciepłych w silniku i większych wypromieniowywanych zakłóceń (duże tętnienia prądu). Natomiast gdy napięcie jest z przedziału 0,6..2,1, aktywny jest tryb „mieszanego opadania”, który jest połączeniem obu ww. trybów. Konfiguracja jest możliwa dzięki zworze JP4 i rezystorom R13, R14, R16 tworzących razem „programowalny” dzielnik napięciowy. Wartości rezystorów gwarantują poprawność napięcia na wejściu PFD dla pełnego zakresu napięć zasilających logikę U1. Gdy wejście SR(26) układu U1 jest w stanie L, wtedy włączona jest synchroniczna recykulacja prądów powstających w wyniku indukowania napięć na indukcyjności uzwojeń silnika przy ich wyłączeniu. Powoduje to zmniejszenie mocy strat ciepłych układu scalonego. Rolę diod recykulacyjnych zawartych w strukturach tranzystorów mocy ($V_f=1,4V$) przejmują same tranzystory o niewielkiej rezystancji źródło-dren (ok. $R_{ds}=0,4\Omega$), **rysunek 3e i 3d**. „Grzanie” układu można zmniejszyć, powierzając funkcję recykulacji szybkim zewnętrznym diodom D1...D8 o napięciu przewodzenia mniejszym niż 1,4V.

Układ wymaga dołączenia do złącza J1 dwóch napięć zasilających odpowiednio od +3V do +5,5V dla obwodów logiki i od

+8 do 35V (VCC) dla zasilania mostków mocy sterujących silnikiem, przy czym to drugie napięcie nie musi być stabilizowane. Jednak w żadnym wypadku nie może przekroczyć +35V, co może się zdarzyć w przypadku recykulacji prądów uzwojeń silnika. W takich przypadkach na kondensatorze C4 napięcie może przekroczyć wartość krytyczną i uszkodzić U1. Aby temu zapobiec, zastosowano zabezpieczenie nadnapięciowe na elementach DZ1, R1, T1, które zapobiega wzrostowi napięcia powyżej około 32V. Kondensatory C1...C6 filtrują napięcia zasilające. Wejścia sterujące dostępne są na złączu J2. W czasie trwania stanu L na wejściu !RESET impulsy na wejściu STEP są ignorowane, sekwencer ustawiany jest w pierwszym stanie sekwencji, wyjścia mostków mocy są wyłączone. Stan H podany na wejście !ENABLE wyłącza wyjściowe mostki mocy, przy czym zmiany stanów na wejściach MS1, MS2, STEP, DIR zmieniają stan sekwencera. Aktywowane stanem H wejście !SLEEP wyprowadza U1 ze stanu zmniejszonego poboru energii. Stan logiczny na wejściu DIR wyznacza kolejność przyjmowanych przez sekwencer stanów sekwencji, kierunek obrotów silnika. Kombinacja logiczna

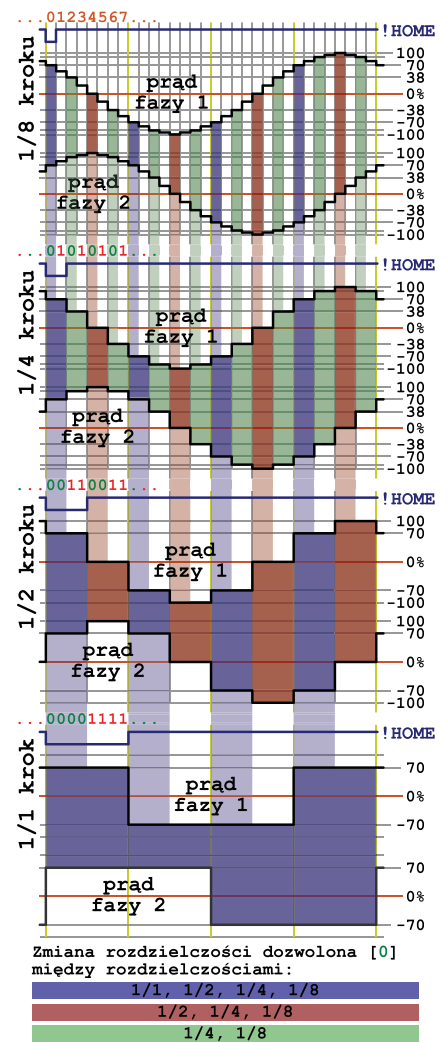


na wejściach układu U1 (19, 20) ustawia rozdzielczość kroków: pełnokrokową, 1/2, 1/4 lub 1/8 kroku. Rozdzielczość może być ustawiona sprzętowo za pomocą jumperów na JP2 i JP3 (podciąganie rezystorami R9,R10,R15,R19). Konfiguracja może być zmieniana z zewnątrz przez ustawienie stanów logicznych na złączu J2 odpowiednio na wejściach MS1 i MS2. Zmiana rozdzielczości kroku podczas pracy jest możliwa, ale dla zapewnienia płynności ruchu wału silnika (zmiana nie może powodować zmiany prądów uzwojeń silnika) musi wystąpić w odpowiednim momencie. Zmiana rozdzielczości z ustawionej na dowolną jest możliwa w pierwszym stanie sekwencji lub co pełny krok. Zmiana w pośrednich stanach sekwencji jest zależna od aktualnie ustawionej rozdzielczości, ale jest obwarowana restrykcjami, co ilustruje **rysunek 4**. Synchronizację może zapewniać wyjście informacyjne !HOME, które przyjmuje stan L, gdy sekwencer jest w stanie startowym. Zbocze narastające na wejściu STEP powoduje przejście sekwencera do kolejnego stanu, czyli wykonanie kroku lub mikrokroku. Wejścia sterujące są podciągnięte rezystorami R3...R8 do szyn zasilania, a R2 pełni funkcję zabezpieczenia przeciwzwarciowego wyjścia HOME. Zmiany stanów logicznych na wejściach można dokonać po czasie większym od 1ms po „obudzeniu” U1 z wejścia !SLEEP. Minimalny czas trwania impulsu wysokiego i niskiego na wejściu STEP nie powinien być mniejszy od 1μs. Zbocze narastające musi się pojawić co najmniej po 200ns od zmiany stanu na wejściach MS1, MS2, DIR oraz od zbocza narastającego na wejściu !RESET. Natomiast zmiana stanu na wejściach MS1, MS2, DIR, !RESET może być dokonana po 200ns od wystąpienia zbocza narastającego na wejściu STEP. Zwora na JP5 umożliwia wybór między wewnętrznym źródłem napięcia referencyjnego a zewnętrznym podawanym na wejście EXVREF. Przy wybranym wewnętrznym źródle napięcia referencyjnego wejście BOOST umożliwia przełączanie wartości prądów uzwojeń między dwoma (trzema) wartościami wyznaczanymi potencjometrami montażowymi. Jest to potrzebne w aplikacjach silników krokowych, gdzie pełny moment obrotowy silnika wymagany jest podczas obrotu jego wału i wtedy prąd I_{off} powinien być zbliżony do prądu nominalnego silnika. Gdy wał jest w spoczynku i moment trzymający może być zmniejszony, można zmniejszyć I_{off} , co korzystnie wpłynie na straty ciepłne w sterowniku i silniku. P2 wyznacza prąd roboczy, a P1 prąd trzymania. Wejście BOOST może być sterowane logiką dwu- lub trzystanową. Stan H powo-

duje podanie na P2 napięcia +5V pomniejszonego o V_f D9, który przy wartościach R12, R18 jak na schemacie nie ma znaczenia. Rezystancja równoległa P1 do V_f D9 ma także pomijalne znaczenie i włączony jest wtedy prąd nominalny. Prąd trzymania jest włączony stanem L i P2 jest zasilany z suwaka T1, który pracuje jako dzielnik napięcia. Pozostawienie BOOST niepodłączonego wymusi prąd na poziomie między prądem nominalnym i trzymania zależnie od ustawień P1 i P2.

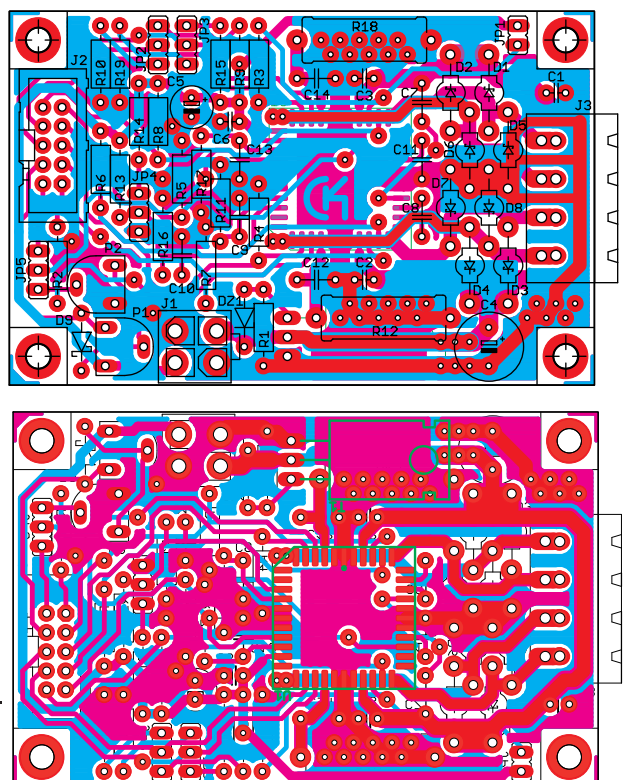
Montaż i uruchomienie

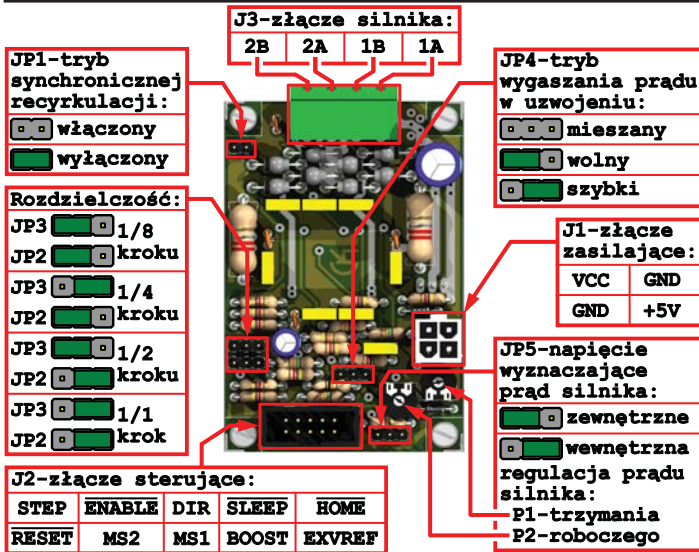
Obwód drukowany dwuwarstwowy pokazany jest na **rysunkach 5 i 6**. Po sprawdzeniu obwodu drukowanego na występowanie zwarcie i pęknięć w połączeniach, montaż warto rozpocząć od starannego przylutowania układu U1 (SMT), zwracając uwagę na zwarcia między nóżkami. Następnie należy pogrubić pozabawione warstwy przeciwlutowniczej ścieżki (widoczne na rysunku), nakładając na nie stop lutowniczy i uważając by stop nie dostał się pod tranzystor T1. Kolejność lutowania pozostałych elementów jest dowolna. Zamiast „wygodnego”, ale stosunkowo kosztownego złącza J3 można zastosować dwa tańsze złącza typu ARK. U1 może rozproszyć 2W mocy traconej w temperaturze otoczenia do +80°C. Przy prądzie wyjściowym równym 1,5A moc tracona w U1 wynosi około 1W przy włączanej recyrkulacji synchronicznej. Przy wyłączonej recyrkulacji synchronicznej dzięki zewnętrznym diodom D1...D8 moc tracona w U1 jest wydzielana na rezystancji otwarcia tranzystorów końcowych. Bez diod D1...D8 moc tracona sporo wzrośnie ze względu na napięcie przewodzenia



Rys. 4

Rys. 5 i 6

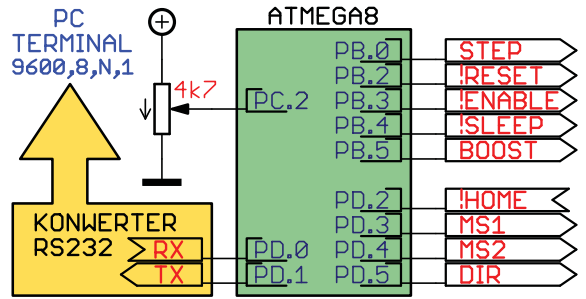




Rys. 7

przewidywanego zastosowania. Możliwe kombinacje konfiguracyjne zobrazowano na rysunku 7. Przed włączeniem napięć zasilających suwak P1 należy ustawić w prawe, a P2 w lewe skrajne położenie. Do złącza J1 można podłączyć przełączniki, ustawiające stany logiczne i generator do wejścia STEP i przetestować funkcjonalność sterownika. Należy pamiętać, że domyślnie sterownik jest w trybie „uspienia”. Zatem najpierw należy podać stan H na wejście !SLEEP oraz włączyć mostki wyjściowe, podając stan L na !ENABLE. Po poprawnym podłączeniu silnika (identyfikacja wyprowadzeń silników krokowych była wielokrotnie opisywana na łamach EdW) i włączeniu napięć zasilających, mierząc napięcie V_{ref} i korzystając ze wzoru na I_{off} , P2 ustawić prąd roboczy silnika, nie przekraczając wartości prądu znamionowego silnika. Następnie ustawić prąd trzymania, ustawiając P1 np. w środkowe położenie. Do uruchamiania lepiej użyć mikroprocesorowego zestawu uruchomieniowego (np. ZL2AVR). Na rysunku 8 pokazano schemat „sprzęgu” sterownika z mikroprocesorem (nie uwzględniono szyn zasilania). Ważne, aby napięcie zasilające logikę sterownika miało ten sam potencjał (+5V) co zasilające mikrokontroler. Konieczne jest połączenie masy sterownika z masą zastawu uruchomieniowego. Przykładowy program umożliwiający przetestowanie sterownika dla lepszej czytelności napisany został dla kompilatora

Bascom AVR. Większą część kodu źródłowego stanowią procedury tworzące prosty system operacyjny umożliwiający wygodne sterowanie z programu terminalowego. Głównym fragmentem kodu jest procedura obsługi przerwania Ocl1a. Umożliwia ona zmianę rozdzielczości krokowej i kierunku obrotów podczas pracy silnika w dogodnych do tego momentach sekwencji (zmiana nie powoduje zmiany prądów w uzwojeniach). W pierwszym trybie (CSM ON) prędkość obrotowa jest stała, niezależna od rozdzielczości krokowej. Częstotliwość zmiany kroku (STEP) rośnie dwukrotnie na pojedyncze zwiększanie rozdzielczości. W drugim (CSM OFF) prędkość zależna jest od rozdzielczości. Częstotliwość zmiany kroku (STEP) maleje dwukrotnie na pojedyncze zwiększanie rozdzielczości. Modyfikując część procedury dla drugiego trybu przez dodanie współczynników opóźnień osobnych dla każdej z rozdzielczości, można uzyskać różne prędkości zależnie od rozdzielczości kroku. Częstotliwość kroku, czyli prędkość obrotowa jest regulowana potencjometrem. Mimo że udało się uzyskać dużą maksymalną (około 18kHz) częstotliwość poprawne zależności czasowe dla trybu (CSM ON) występują w zakresie od minimalnej do 3..4kHz. Wynika to z czasu wykonywania instrukcji w obsłudze przerwania. Zakres częstotliwości celowo nie został zawężony, aby można było testować silniki na maksymalną prędkość obrotową (utrata momentu obrotowego). Oprócz



Rys. 8

Wykaz elementów

R12, R18.....	0,22Ω 3W	C5.....	100u/16V
R16.....	1kΩ 1/4	C4.....	470u/50V
R1-R5,R9,R10,R14,R15,R19.....	4,7kΩ 1/4W	D9.....	BAT85
R13.....	10kΩ 1/4W	DZ1.....	30V
R6, R7, R8.....	15kΩ 1/4W	D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7,D8.....	BYV27
R11, R17.....	47kΩ 1/4W	T1.....	TIP130
P1, P2.....	4,7kΩ montażowy poziomy	U1.....	A3977/PLCC44
C9, C13.....	1n foliowy	JP1.....	Goldpin 2pin + zwora
C1, C2, C3, C6.....	100n ceramiczny	JP2,JP3,JP4,JP5.....	Goldpin 3pin+zwora
C10, C12, C14.....	100n foliowy	J1.....	.MF04 Złącze Crimp-Terminal
C7, C8, C11.....	220n foliowy	J2.....	ML10
		J3.....	MSTBA4 Złącze śrubowe rozłączne

Płytką drukowaną jest dostępna w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-3071.

pojedynczych poleceń program ma funkcję sekwencyjnego testu. W tym trybie prompt ma postać dwukropka, a odebranie znaku CR powoduje przejście do następnego kroku testu. Po wykonaniu całej sekwencji program powraca do interpretacji poleceń sterujących. Polecenia można zadawać z dowolnego programu terminalu RS232 przy ustawieniach transmisji 9600,8,n,1. Źródła i wsad programu dla jednostki ATMEGA8 (zewnętrzny kwarc 12MHz) dostępne są na Elportalu. Jediną niesprawdzaną funkcją jest zadawanie zewnętrznego napięcia V_{ref} na złącze J2 EXVREF (9). Szczegółowy opis programu jest zbędny, ponieważ wystarczy do tego analiza kodu źródłowego, komentarzy oraz wyświetlanej na terminalu listy poleceń sterujących poleceniem „help”. Wykorzystywanie wszystkich możliwych funkcji sterownika w wielu przypadkach nie będzie konieczne. Zwykle sterownik będzie współpracował z dedykowanym systemem mikroprocesorowym gdzie oprócz ww. parametrów zadawana będzie liczba kroków do wykonania, trajektoria prędkości ruchu etc. Budowa i oprogramowanie takiego systemu nie powinno sprawić trudności bardziej zaawansowanym Czytelnikom.

Cyprian Kamil Kowalski
c4v2@o2.pl

Literatura:

1. Jacek Przepiórkowski „Silniki elektryczne w praktyce elektronika” wyd. II BTC.
2. Nota aplikacyjna układu A3977.pdf oraz informacje techniczne dostępne na <http://www.allegromicro.com>