



Fazowy regulator obrotów silników AC z izolacją galwaniczną



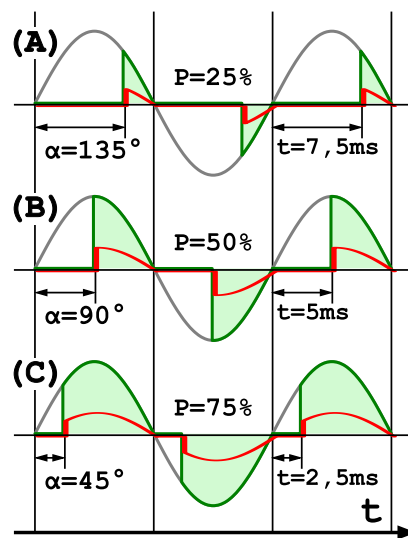
Regulator, dołączany do mikrokontrolera w prosty i bezpieczny sposób, umożliwia sterowanie mocą silnika komutatorowego AC np. w elektronarzędziach. Wejście akceptuje sterowanie PWM oraz napięciowe 0...+5V.

Gdy zachodzi potrzeba sterowania obrotami uniwersalnego silnika komutatorowego AC, pojawia się problem. Większość przeznaczonych do tego celu sterowników jest zasilanych bezpośrednio z sieci energetycznej 230V. Takie rozwiązanie w większości przypadków przekreśla możliwość bezpośredniego połączenia układu regulacyjnego do sterującego mikrokontrolera. Prezentowany sterownik niewielkim nakładem „sprzętowym” wyposażono w prosty optoizolowany galwanicznie interfejs, przez co jego podłączenie do mikrokontrolera nie stanowi problemu. Oprócz sterowania przebiegiem PWM istnieje również możliwość sterowania zwykłym potencjometrem (1kΩ A) bez specjalnych wymagań, jakie są stawiane w aplikacji U2008B (plastikowa oś, zabezpieczająca użytkownika przed przypadkowym kontaktem z obwodami będącymi na potencjale sieci energetycznej 230V). Wymagane jest jedynie napięcie zasilania „niskonapięciowej części pierwotnej” ze stabilizowanego źródła napięcia o wartości 5V, oczywiście izolowanego galwanicznie transformatorem od

obwodów sieci 230V. Mimo braku wejścia tachometrycznego umożliwiającego realizację układu z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, zapewniającego większą niezależność obrotów od obciążenia silnika, układ okazuje się przydatny przy mikroprocesorowym, cyfrowym sterowaniu mocą elektronarzędzi.

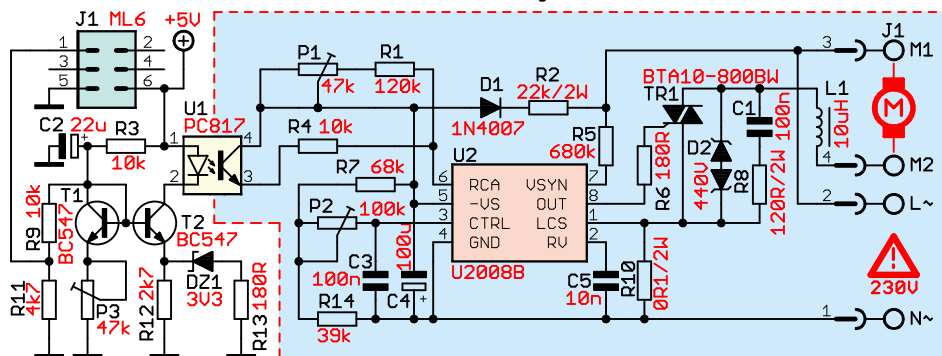
Opis układu

Do sterowania prędkością obrotów uniwersalnych silników komutatorowych prądu przemiennego stosowana jest metoda regulacji fazowej mocy. Element wykonawczy, triak, włączany jest w trakcie trwania półokresu napięcia sieci. Triak samoczynnie wyłącza się po zmniejszeniu płynącego prądu poniżej wartości prądu podtrzymania. Im wcześniej po przejściu napięcia sieciowego przez zero triak zostanie włączony (podczas trwania impulsu wyzwalającego prąd obciążenia



Rys. 1

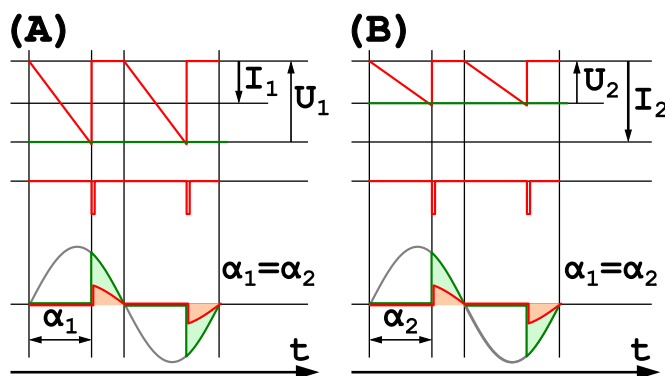
Rys. 2



musi przekroczyć wartość prądu podtrzymania triaka) tym większa moc zostanie doprowadzona do obciążenia. Moment włączenia triaka decyduje o napięciu i prądzie skutecznym na obciążeniu, czyli mocy, co obrazuje **rysunek 1**. Na **rysunku 2** przedstawiono schemat układu. Zastosowany fazowy kontroler U2 (U2008B) ma obwody eliminujące większość problemów pojawiających się przy wyzwalaniu triaka sterującego silnikiem. Układ U2008B był szczegółowo opisywany w EP 5/98, dlatego opis jego działania zostanie ograniczony do niezbędnego minimum. Kontroler zasilany jest bezpośrednio z obwodów sieci energetycznej 230V przez elementy R2 i D1. Wewnętrzny stabilizator ustala napięcie zasilania $-VS$ (5) na około $-14V$ względem nóżki GND (4) połączonej do biegunu sieci energetycznej. Zasilanie układu napięciem ujemnym ma na celu poprawę warunków

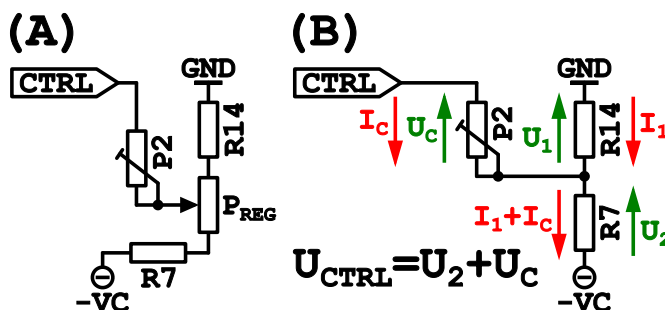
wyzwalana triaka tj. większą czułość bramki, gdy jest wyzwalana ujemnymi impulsami.

W układzie U2 działanie regulacji fazowej mocy polega na synchronicznym ładowaniu kondensatora C5. Po przejściu przez zero sieci energetycznej rozładowany kondensator ładowany jest ze źródła prądowego prądem o wartości ustalonej przez rezystancję dołączoną między $-VS$ (5) i wyprowadzenie RCA (6). Synchronizację z przebiegiem napięcia sieci umożliwia wyprowadzenie VSYNC (7) dołączone przez R5 do biegunu sieci energetycznej. Liniowo narastające napięcie na C5 jest poddawane komparacji z napięciem z wyprowadzenia CTRL (3). Gdy zostanie przekroczony próg napięciowy, kondensator C5 jest szybko rozładowywany i układ jest gotowy do wygenerowania impulsu wyzwalającego triak. Sprawdza jednak, czy wywołony w poprzednim półokresie triak jeszcze przewodzi prąd (ze względu na mogące wystąpić na obciążeniu przesunięcie prądu względem napięcia). Jeżeli triak przewodzi, to układ wstrzymuje się z wygenerowaniem impulsu bramkowego do czasu jego wyłączenia. Synchronizacja z przebiegiem prądu na obciążeniu o charakterze indukcyjnym zapobiega „gubieniu półokresów”, czyli wyzwalaniu triaka co drugi półokres napięcia sieci. Innym usprawnieniem jest tzw. wielokrotne wyzwalanie. Polega ono na sprawdzaniu, czy po podaniu impulsu wyzwalającego



Rys. 3

Rys. 4



triai rzeczywiście się otworzył. Jest to potrzebne, gdy z jakiejś przyczyny prąd po wyzwoleniu triaka nie osiągnie wartości podtrzymującej jego przewodzenie, np. szczytka trafiła na przerwę między stykami komutatora lub impuls wyzwalający pojawił się w momencie przejścia napięcia sieci przez zero, i przez okres trwania impulsu (w modelowym układzie 90us) wartość prądu płynącego przez triak była niewystarczająca do jego „zapłonu”. Za wyzwalanie triaka, monitorowanie jego stanu i synchronizację prądową odpowiada nóżka OUT (8).

Przypadki różniące się wartościami prądu ładowania kondensatora (I_1, I_2) oraz napięciem progowym komparatora (U_1, U_2) ilustruje **rysunek 3**. Kąt „otwarcia” triaka (α_1, α_2) w obu przypadkach triaka jest jednakowy. Zatem regulacja kąta włączenia triaka może być dokonywana na dwa sposoby. Przy stałym napięciu na wyprowadzeniu CTRL (3) kąt wyzwalania można regulować wartością prądu ładującego kondensator tj. zmianą stałej czasowej ładowania kondensatora C5. I odwrotnie, regulację można przeprowadzać napięciem na wyprowadzeniu CTRL (3) przy stałym prądzie ładującym. Napięcie wyznaczające kąt otwarcia triaka zawiera się w przedziale od: $-1V$ (kąt minimalny, maksymalne obroty silnika) do $-9V$ (kąt maksymalny, minimalne obroty silnika). Przyjęte przez producenta układu rozwiązanie ma uprościć regula-

cję układu przy uruchamianiu przez eliminację precyzyjnego doboru rezystorów dzielnika regulacyjnego dołączanego do wyprowadzenia CTRL (3).

Zakres wartości rezystancji ustalającej prąd ładowania kondensatora jest ściśle powiązany z jego pojemnością i można go odczytać z wykresu w nocie katalogowej producenta. Natomiast pojemność kondensatora wyznacza szerokość impulsu wyzwalającego.

Przydatną w praktyce funkcją kontrolera jest prądowa korekta obciążenia polegająca na utrzymywaniu zadanych obrotów silnika przy zmianach jego obciążenia. Im bardziej obciążony jest silnik, tym większy spadek napięcia na rezystorze pomiarowym R10, dołączonym do nóżki LCS (1) U2. Napięcie to ma wpływ na kąt otwarcia triaka. Jeżeli wzrośnie obciążenie, to triak będzie wyzwalany nieco wcześniej, zwiększając prąd

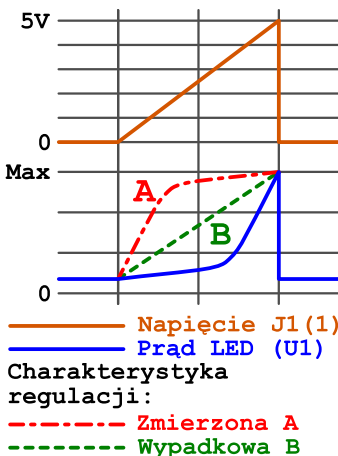
i napięcie na silniku, utrzymując w pewnym zakresie ustawione, stałe obroty.

Wyprowadzenie VSYNC (7) oprócz synchronizacji z przebiegiem napięcia sieci, pełni również funkcję detekcji zmian napięcia w sieci. Informacją o wartości napięcia sieci jest płynący przez R5 prąd, który jest wykorzystywany do napięciowej korekty obrotów silnika. Podobnie jak w przypadku korekty prądowej możliwe jest utrzymywanie ustawionej, stałej prędkości obrotowej silnika (oczywiście w pewnym zakresie), tym razem przy zmianach napięcia sieciowego. Zarówno korekta prądowa, jak i napięciowa dokonywana jest za pośrednictwem nóżki CTRL (3), co ilustruje **rysunek 4**. Napięcie na niej nie jest tylko wyznaczane przez dzielnik R7, R14. Wyprowadzenie jest wejściem i wyjściem jednocześnie, z którego może wpływać prąd o wartości zależnej od stanu opisanych wyżej obwodów korekty prądowej i napięciowej. Wypływający z wyprowadzenia prąd, powodując spadek napięcia na zmiennym rezystorze P2, powoduje odpowiednie zwiększenie napięcia na wyprowadzeniu (wyznaczanego przez R7, R14). Regulując wartość rezystancji P2, można ustawić wymagane parametry ww. korekty. Modyfikacja podstawowego schematu z noty katalogowej polega na usunięciu potencjometru ustalającego napięcie A na CTRL i zastąpieniu go dzielnikiem R7, R14 B. Regulacja kąta włączenia odbywa

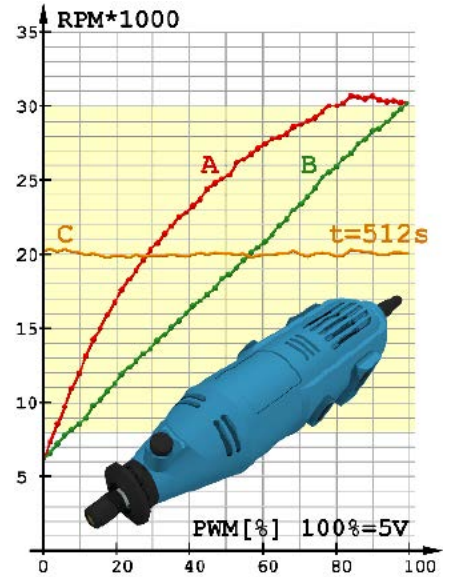
się zmianą prądu ładującego kondensator C5, który jest ustalany „statycznie” przez rezystancje P1, R1. Równoległe dołączenie do tych elementów fototranzystora U1 i R4 umożliwia (zależnie od stopnia otwarcia fototranzystora U1) zwiększanie prądu ładowania C5, co przekłada się na wcześniejsze otwieranie triaka. Stopień oświetlenia fototranzystora U1 zależy od oświetlenia jego bazy, czyli od prądu płynącego przez strukturę LED U1. W efekcie uzyskano optoizolowaną regulację mocy na obciążeniu w pełnym zakresie kątów włączenia triaka $180... \approx 0^\circ$.

Napięcie sterujące ze złącza J1 (1) z zakresu 0...+5V podawane jest na filtr dolnoprzepustowy, który tworzą elementy R9 i C2. Filtr umożliwia sterowanie obrotami silnika przebiegiem PWM np. w przypadku sterowania z użyciem mikrokontrolera. Napięcie z filtra wyznacza prądy płynące przez gałęzie lustra prądowego zrealizowanego na tranzystorach T1 i T2. Spadek napięcia na P3 wywołany przez przepływ prądu sterującego powoduje zwiększenie napięcia bazy T2 i takie jego „odetkanie”, aby wywołany spadek napięcia na R12 był równy napięciu na P3. Sterowany w ten sposób T2 stanowi źródło prądowe zasilające LED transoptora U1. Stosunek prądów płynących w gałęziach lustra wynika z proporcji wartości rezystancji „emiterowych” P3 i R12. Nie jest on jednak stały. Praktyczne pomiary prędkości obrotowej wirnika podłączonego silnika w funkcji liniowo narastającego napięcia sterującego (prądu LED U1) wykazały jej znaczną nieliniowość. Choć wprowadzenie programowej korekty przebiegu w mikrokontrolerze sterującym PWM nie jest wielkim problemem, to zastosowano elementy linearyzujące charakterystykę

Rys. 5



regulacji, co może być przydatne przy analogowym sterowaniu obrotami (np. liniowym potencjometrem $1k\Omega$, który ze względu na montaż, prowadzenie przewodów itp. ma być izolowany galwanicznie od części wysokonapięciowej). W celu uzyskania zadowalającej liniowości regulacji obrotów, przy wartościach potencjometru większych od $1k\Omega$ wymagane jest „pośrednictwo” wtórnika napięciowego. Aby uzyskać liniowość regulacji obrotów, wykres prądu płynącego przez LED transoptora powinien być nieliniowy, tworząc niejako funkcję „odwrotną do zaobserwowanej” nieliniowej funkcji obrotów. Do uzyskania potrzebnej funkcji prądu LED U1 zastosowano dwuodcinkową metodę aproksymacji liniowej, którą realizują dołączone równoległe do R12 elementy R13 i DZ1. Elementy te zaczynają przewodzić prąd, bocznikując R12 po przekroczeniu na nim napięcia Zenera DZ1, zmieniając stosunek rezystancji emiterowych obu gałęzi lustra prądowego. Sposób uzyskania liniowej wypadkowej funkcji uwidoczniono na rysunku 5. Natomiast rysunek 6 obrazuje zarejestrowane wykresy obrotów dla popularnej szlifierki prostej Celma PRAA-3AEO przy nieobciążonym wrzecionie. Krzywa A jest wykresem obrotów przy liniowo narastającym sygnale PWM bez obwodów linearyzujących. Po dodaniu obwodów uzyskana funkcja jest liniowa (krzywa B) z przybliżeniem całkowi-



Rys. 6

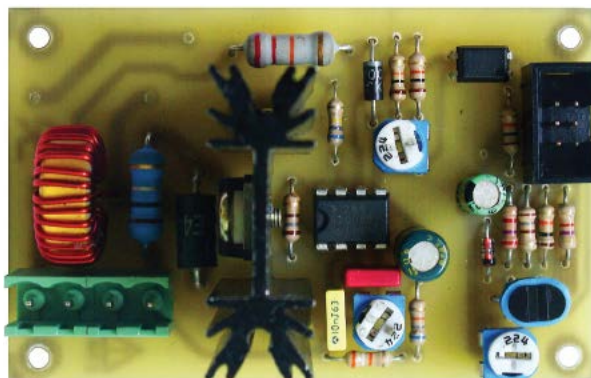
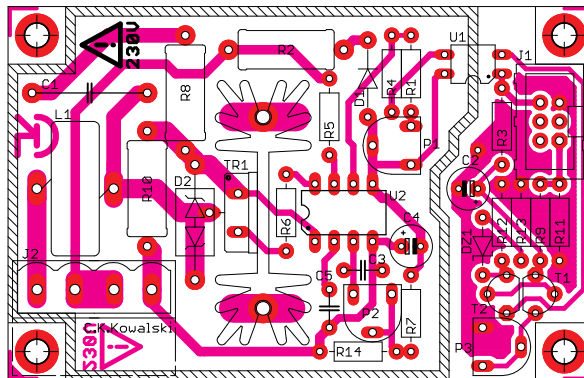
Rys. 7

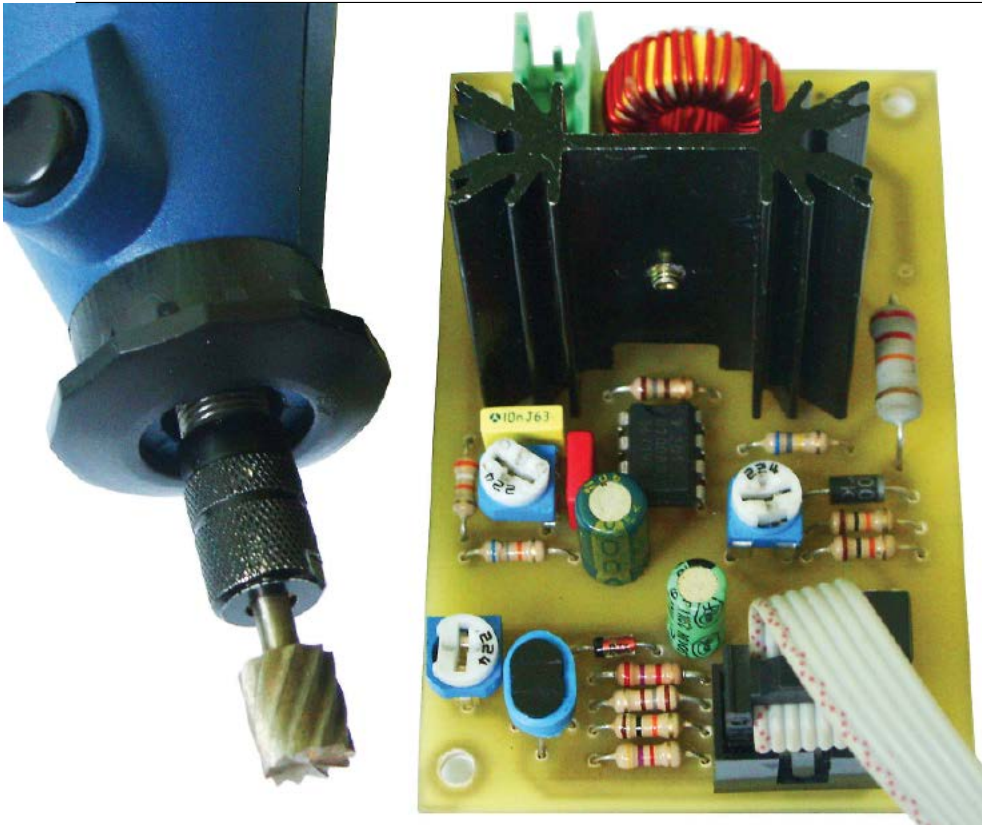
cie wystarczającym w układzie regulacji obrotów bez pętli sprzężenia zwrotnego. Również dryfy temperaturowe lustra prądowego wraz z elementami towarzyszącymi mają w tym zastosowaniu pomijane znaczenie. Krzywa C obrazuje stałość obrotów w czasie przy sygnale sterującym PWM o współczynniku wypełnienia odpowiadającym 20000 obrotów na minutę. Rolą R3 jest zapewnienie prądu spoczynkowego LED transoptora U1 przy napięciu sterującym równym 0V. Liniowość regulacji jest zapewniona przy nieobciążonym wirniku silnika, a przy obciążeniu silnika zaczynają działać wyżej opisane, wbudowane w U1 obwody korekcji prądowej, które w pewnym zakresie stabilizują obroty.

Dławik L1 spowalnia narastanie prądu w strukturze triaka zaraz po otwarciu, uniemożliwiając przegrzanie (zmniejszenie trwałości, przebicie) nie w pełni przewodzących struktur. Dławik nie jest zatem filtrem i chwilę po otwarciu jego rdzeń się nasycy. Na PCB przewidziano miejsce na obwód gasikowy C1, R8 ograniczający szybkość narastania napięcia na triaku. W prototypie gasik okazał się zbędny i nie został zamontowany. Dwukierunkowy tranzystor D2 ma uchronić triak przed przekroczeniem wartości napięcia V_{DRM} spowodowanym przepięciami na obciążeniu.

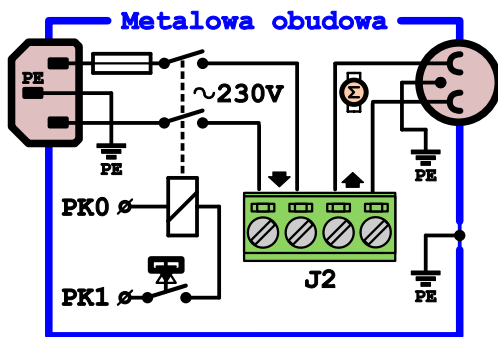
Montaż i uruchomienie

Jednowarstwowy obwód drukowany pokazano na rysunku 7. Kolejność





obrotów silnika. Należy pamiętać, że regulacje są w jakimś stopniu od siebie zależne i po korekcji jednego potencjometru wymagana jest korekcja pozostałych. Szczególnie dotyczy to zmian wartości rezystancji P2. Są to jedne wymagane regulacje układu. Różnice wartości elementów na fotografiach od zaproponowanych na schemacie wynikają z braku elementów o pożądanych wartościach w czasie montażu prototypu. W przypadku sterowania za pomocą mikrokontrolera zalecane jest włączanie i wyłączanie sterownika przez zastosowanie do tego celu przełącznika w konfiguracji styków NO z możliwością odłączenia cewki przełącznika od obwodów sterujących przełącznikiem dwustanowym np. według rysunku 8. Uchroni to przed niebezpiecznymi sytuacjami np. w przypadku wymiany narzędzia, gdyby triak został wyzwolony przez przepięcie. Triaki to „kapryśne” elementy i lepiej dmuchać na zimne. Ze względu na obwody będące na potencjale sieci energetycznej 230V wskazane jest zamknięcie układu w obudowie z tworzywa sztucznego. W przypadku zastosowania obudowy metalowej przewód ochronny PE (żółto-zielony) należy koniecznie połączyć z obudową.



Rys. 8

wanie w układzie napięcia groźnego dla życia i zdrowia należy zachować szczególną ostrożność (praca jedną ręką). Osoby niepełnoletnie mogą uruchomić układ tylko pod opieką wykwalifikowanych osób dorosłych. Potencjometrem P2 należy ustawić wymagany zakres korekcji prądowej (zakres stałości obrotów z obciążeniem i bez). Przy zwartym wejściu J1 (1) do masy P1 należy ustawić minimalne obroty silnika. Następnie dołączając wejście J1 (1) napięcia +5V P3 ustawić maksymalne

Cyprjan Kamil Kowalski
c4v2@o2.pl

Literatura:

1. Jacek Przepiórkowski „Silniki elektryczne w praktyce elektronika”, wyd. II ,BTC
2. Piotr Górecki, Zbigniew Orłowski „Regulator obrotów silnika 220V” „Elektronika Praktyczna” 5/98
3. Nota katalogowa układu U2008B.

lutowania elementów w sprawdzonej płycie PCB jest dowolna. Jedynie jako ostatni należy zamontować radiator z uprzednio przymocowanym triakiem (z użyciem podkładek izolująco-termoprzewodzących). Ścieżki pozbawione warstwy przeciwłutowicznej należy wzmocnić stopem lutowniczym. W układzie modelowym wartość bocznika R10 dobrana została do współpracy ze szlifierką precyzyjną prostą typu Celma PRAa3AEO. Dla innego typu silnika może zająć konieczność dobrania jego wartości tak, aby spadek napięcia na nim nie przekraczał $\pm 250\text{mV}$ przy maksymalnym zakładanym obciążeniu współpracującego silnika. Uruchomienie i kalibrację układu należy przeprowadzić po dołączeniu obciążenia (silnika), napięcia zasilającego „stronę pierwotną” +5V, napięcia zasilającego stroną wysokonapięciową 230V AC. Ze względu na występo-

Wykaz elementów

Rezystory:

R10	.....	0,1 Ω 2W (zależnie od obciążenia)
R8	.....	120 Ω 2W
R6, R13	.....	180 Ω 1/4W
R12	.....	2,7k Ω 1/4W
R11	.....	4,7k Ω 1/4W
R3, R4, R9	.....	10k Ω 1/4W
R2	.....	22k Ω 2W
R14	.....	39k Ω 1/4W
R7	.....	68k Ω 1/4W
R1	.....	120k Ω 1/4W
R5	.....	680k Ω 1/4W
P1, P3	.....	47k Ω pot. mont. poziomy
P2	.....	100k Ω pot. mont. poziomy

Kondensatory:

C5	.....	10n/63V foliowy
C1	.....	100n/630V klasa X2

C3	.....	100n/63V foliowy
C2	.....	22u/16V
C4	.....	100u/25V
Półprzewodniki:		
D1	.....	1N4007
D2	.....	1.5KE440CA 440V/3A tranzystor dwukierunkowy
DZ1	.....	3V3
T1, T2	.....	BC547
TR1	.....	BTA10-800BW
U1	.....	PC817
U2	.....	U2008B
Inne:		
L1	.....	10uH/2A
J1	.....	ML6 – złącze IDC
J2	.....	złącze śrubowe
Radiator	.....	SK104 h=38mm

Komplet podzespołów z płytka jest dostępny w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-3113.