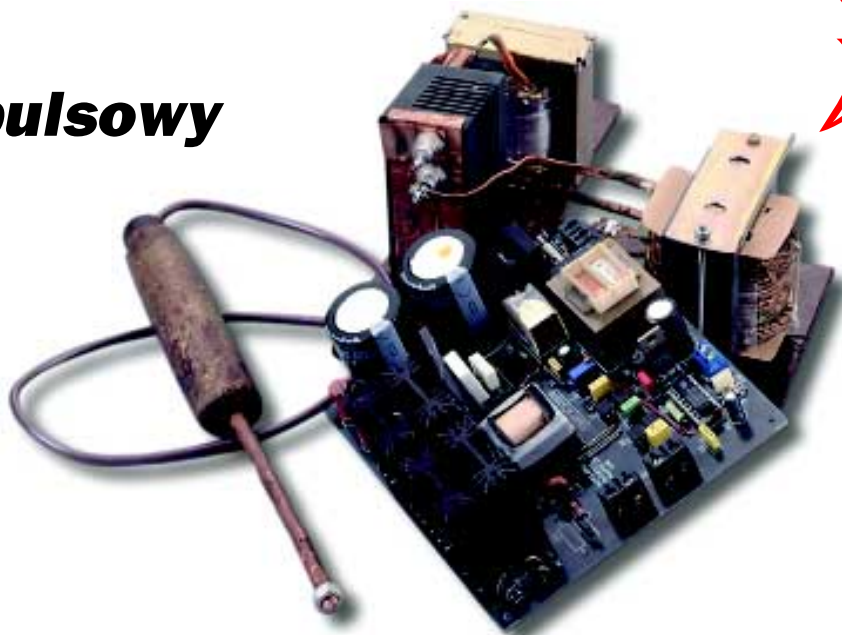


Amatorska spawarka, część 1

Sterownik impulsowy

AVT-837

PROJEKT
Z OKŁADKI



Temat amatorskiej spawarki sterowanej elektronicznie od dawna wzbudzał zainteresowanie wielu elektroników i do dzisiaj doczekał się co najmniej kilkunastu, mniej lub bardziej udanych, opracowań, wynikiem których były układy sterowania z tyrystorami.

Postęp w elektronice powoduje jednak, że to, co jeszcze wczoraj można było nazwać konstrukcją nowoczesną, dziś może być już przestarzałe.

Pojawienie się na rynku znakomitych jakościowo i wytrzymałych tranzystorów mocy pozwala rozwiązać problem amatorskiej spawarki raz jeszcze, tym razem już bez ciężkiego i nieporęcznego transformatora sieciowego.

Po raz pierwszy prezentujemy na łamach Elektroniki Praktycznej urządzenie tak dużej mocy. Mimo iż jego wykonanie nie jest wcale trudne, budowy powinni podjąć się jedynie elektronicy z dużym doświadczeniem zawodowym. Kontakt z wysokimi napięciami, siecią energetyczną, dużymi prądami, z wysoką temperaturą łuku i generowanym przez niego promieniowaniem UV wymaga staranności w montażu urządzenia i uwagi przy jego uruchamianiu.

Opisywany impulsowy sterownik spawarki ma konstrukcję celowo maksymalnie uproszczoną, gdyż jest ona przeznaczona do dorywczego spawania małych elementów (np. w modelarstwie). Dzięki eliminacji dużego i ciężkiego transformatora sieciowego, masa spawarki i wymiary są o wiele mniejsze niż w przypadku konstrukcji klasycznej.

Cała spawarka składa się z dwóch części: impulsowego sterownika przetwarzającego napięcie sieci w szybkozmienną falę prostokątną oraz transformatora impulso-

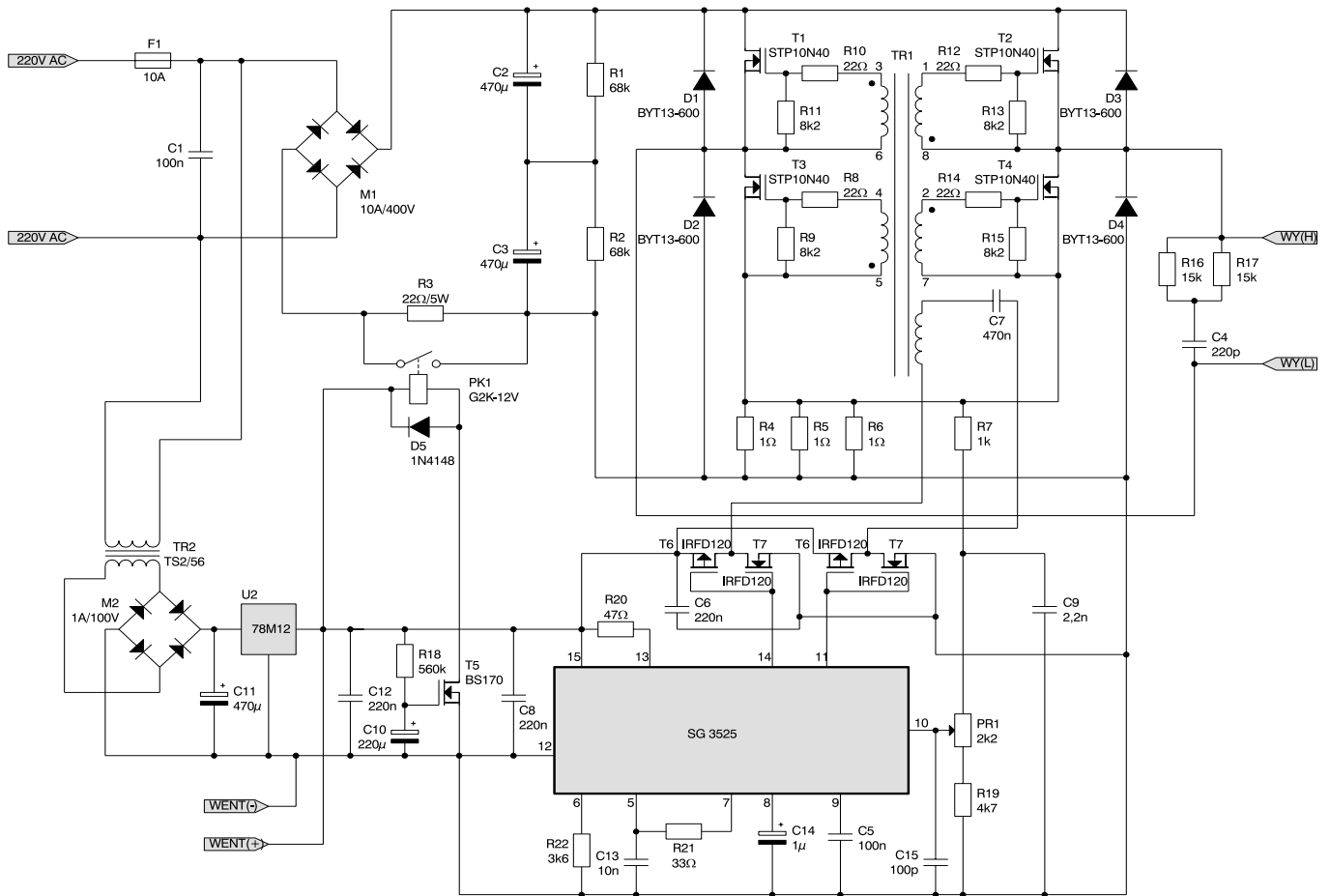
wego wraz z prostownikiem. W pierwszej części artykułu opisany zostanie sterownik, w drugiej przybliżymy sposób wykonania transformatora i elementów strony wtórnej.

Sterownik został zaprojektowany jako uniwersalny moduł, który w zależności od użytych elementów (np. tranzystory kluczujące, transformator wyjściowy) może pracować z mocą wyjściową od około 800W do 2kW. Do wykonania sterownika użyte zostały popularne i ogólnodostępne elementy.

O spawaniu okiem amatora

Nie jestem specjalistą spawalnictwa i nie chciałbym rozpisywać się na temat spawania, podam jedynie garść informacji podstawowych, które przydadzą się do uruchomienia spawarki.

Do spawania niewielkich elementów konieczne jest posiadanie cienkich elektrod otulonych. Na rynku najcieńsze mają średnicę 1,6mm i okazuje się, że są one wystarczające przy mocy układu do 1kW. Wykonanie sterownika w wersji 1,5kW pozwala bezproblemowo korzystać z elektrod o średnicy 2 mm. Aby bez większych kłopotów zapalił się łuk elektryczny, napięcie bez obciążenia na wyjściu spawarki przekracza nieco wartość 50V. W trakcie



Rys. 1. Schemat elektryczny sterownika spawarki.

spawania napięcie jest niższe (nawet 20V) - sterownik ogranicza do zadanej wartości prąd spawania (działa jak klasyczny zasilacz z ograniczeniem prądu). Oczywiście, napięcie wyjściowe spawarki jest wyprostowane, co podobno daje lepsze rezultaty, niż spawanie prądem przemiennym.

Opis układu

Układ spawarki jest elektrycznym zasilaczem impulsowym pracującym w konfiguracji pełnomostkowej (ang. full bridge converter) dużej mocy, z ograniczeniem prądu. Jego konstrukcja została jednak znacznie uproszczona, tak aby wykonanie urządzenia nie było drogie. Trochę gorsze są przez to parametry (np. brak układu korekcji współczynnika mocy skutecznie uniemożliwia rozbudowę sterownika do mocy większej niż 2kW), ale w przeciwnym przypadku konstrukcja byłaby zbyt kosztowna, a sterownik trudny w wykonaniu.

W dwóch „miejscach“ układu sprzeciwiłem się obowiązującym kanonom projektowania. Specjal-

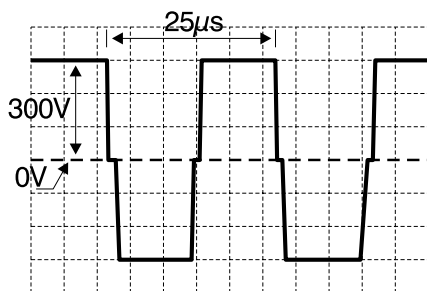
nie o tym piszę, gdyż nie chcę, aby ktoś z Czytelników pomyślał, że „nie umiem“.

Przyznaję, że obwód kontroli prądu kluczy powinienem wykonać w postaci przekładnika prądowego, a nie na zwykłym rezystorze, ale nie chciałem go komplikować - w układzie i tak jest dość magnetyków i nawijania. Dławik ograniczający prąd powinien być po stronie pierwotnej, przez co konstrukcja byłaby bardziej finezyjna, jednak z tak wykonaną pierwszą wersją urządzenia miałem duże kłopoty.

Schemat elektryczny sterownika impulsowego znajduje się na rys. 1. Napięcie sieci poprzez zwłoczny bezpiecznik topikowy jest prostowane w mostku M1. Dołączony równolegle do wejścia kondensator C1 ogranicza przenikanie zakłóceń generowanych przez falownik do sieci. Z uwagi na dorywczy charakter pracy spawarki, w układzie zrezygnowano z zastosowania rozbudowanego filtra przeciwzakłócenowego. Kondensatory C2 i C3 filtrują wyprostowane napięcie sieci. Z uwagi na większą dostępność kondensatorów o napięciu pracy

200V, zamiast jednego kondensatora użyte zostały dwa szeregowo połączone. Rezystory R1 i R2 wyrównują panujące na nich napięcia.

Mimo dużej mocy układu, wartość użytej pojemności filtrującej nie jest duża. Do spawania nie jest bowiem potrzebny prąd dobrze odfiltrowany, nawet spore tętnienia o częstotliwości 100Hz nie przeszkadzają ani w procesie spawania, ani też w pracy falownika. Duże pojemności filtrujące powodowałyby natomiast, iż współczynnik mocy urządzenia byłby mały, co jest nie do przyjęcia w układzie o takiej mocy. W takiej sytuacji układ pobierałby prąd z sieci w postaci krótkich, lecz dużych impulsów doładowujących kondensatory filtru w szczycie sinusoidy zasilającej. Nawet jeśli zapomnimy o zakłóceniach, jakie taka (mocno nieliniowa) praca powoduje, to duże wartości prądu ładowania niepotrzebnie obciążają sieć energetyczną i diody mostka prostowniczego. W skrajnym przypadku może nawet dojść do zadziałania automatycznych bezpieczników w pomieszczeniu, na-



Rys. 2. Kształt napięcia wyjściowego sterownika.

wet jeśli wartość średnia pobieranego prądu będzie poniżej ich progu zadziałania. Wspomniane impulsy mogą je uaktywnić. Niewielka wartość pojemności filtrującej pozwala uzyskać kompromis pomiędzy wartością tych impulsów a stopniem odfiltrowania napięcia zasilającego falownik.

Dwuwartowy transformator sieciowy TR2, wraz z mostkiem prostowniczym M2, kondensatorem C11 i popularnym stabilizatorem trójkońcówkowym U2, tworzy pomocniczy zasilacz niewielkiej mocy przeznaczony do zasilania kontrolera falownika oraz wentylatora chłodzącego układ. W konstrukcji urządzenia zrezygnowano bowiem z umieszczenia dużych i ciężkich radiatorów zdolnych do wychłodzenia elementów mocy w temperaturze pokojowej, na korzyść mniejszych i lżejszych kształtek chłodzonych w sposób wymuszony za pomocą klasycznego, pecetowego wentylatora 12V o rozmiarze 80x80mm.

Aby ograniczyć do bezpiecznej wartości, dla diod prostowniczych mostka M1, prąd ładowania kondensatorów C2 i C3 w momencie włączenia układu do sieci, zastosowany został obwód z ograniczającym prąd ładowania kondensatorów rezystorem R3 i zwierającym go po upływie około 1,5 sekundy przekaźnikiem PK1. Zwieranie rezystora jest konieczne z uwagi na straty mocy jakie element ten powodowałby w pracującym układzie oraz oczywiście na niepożądany spadek napięcia. Do opóźnionego włączania przekaźnika użyty został prościutki obwód z tranzystorem T5 i wyznaczającymi wielkość opóźnienia elementami C10 i R18.

Falownik

Układ falownika tworzą cztery tranzystory MOS: T1, T2, T3 i T4. Tranzystory w mostu przewodzą

parami na przemian, a więc w jednym takcie przewodzi T1 i T4 w drugim takcie T2 i T3. Obciążenie jest włączone w środek mostka, a więc do drenów T3 i T4. Każdemu z tranzystorów kluczujących towarzyszy dioda zapobiegająca zmianie polaryzacji napięcia na tranzystorze w chwili, gdy wszystkie tranzystory są zatkane.

Na rys. 2 przedstawiono kształt napięcia na wyjściu układu. Dwójnik R16 z R17 i kondensator C4 ograniczają wartość szpilkowych impulsów, jakie pojawiają się na zaciskach wyjściowych sterownika, a pochodzą od indukcyjności rozproszenia transformatora impulsowego.

Kluczową sprawą w przypadku spawarki i takiej konstrukcji falownika jest możliwość precyzyjnej kontroli prądu wyjściowego spawarki, tak aby możliwe było jego ograniczenie do zadanego poziomu i stabilizacja. Korzystną cechą układu jest to, iż pomiar prądu na wyjściu urządzenia może zostać zastąpiony poprzez pomiar prądu przewodzonego przez klucze. Kolejną zaletą jest prostota realizacji tej kontroli, sprwadzająca się do włączenia rezystorów R4..R6 pomiędzy źródła tranzystorów T3 i T4 a masę. Kształt przebiegu napięcia na wspomnianym rezystorze odpowiadający płynącemu przez klucze prądowi przedstawia rys. 3.

O ile pomiar prądu jest dziecinnie prosty, o tyle nie da się tego powiedzieć o sterowaniu tranzystorów. Elektrody każdego z tranzystorów są na różnych potencjałach i użycie transformatora sterującego jest koniecznością. Dodatkowym problemem jest konieczność nawinięcia aż pięciu uzwojeń - dla każdego tranzystora po jednym i (jako piąte) uzwojenia pierwotnego.

Odpowiednie połączenie początków i końców transformatora zapewnia żadaną kolejność włączania tranzystorów. Umieszczone w obwodzie bramki każdego z kluczy rezystory szeregowo (R8, R10, R12 i R14) zapewniają ograniczenie prądu przeładowującego pojemność bramka-źródło MOSFET-ów do około 450mA, a rezystory równoległe (R9, R11, R13, R15) tłumią oscylacje pochodzące od pasożytniczych pojemności uzwojeń transformatora, jakie nakładają się na napięcie sterujące.

Kontroler

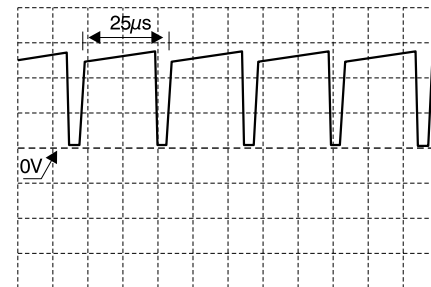
Do sterowania falownikiem wykorzystany został tani i popularny układ kontrolera zasilaczy przeciwobnych UC3525.

Wprawdzie zawiera on wbudowany w strukturę przeciwobny stopień wyjściowy, przystosowany do bezpośredniego sterowania tranzystorów MOS i dostarczający w impulsie prąd do 400mA, jednak w tym zastosowaniu to nieco za mało. W układzie pełnomostkowym kontroler musi włączyć jednocześnie aż dwa tranzystory, a co więcej, z uwagi na dużą moc układu i związaną z tym konieczność ograniczania strat, proces przełączenia powinien nastąpić możliwie szybko.

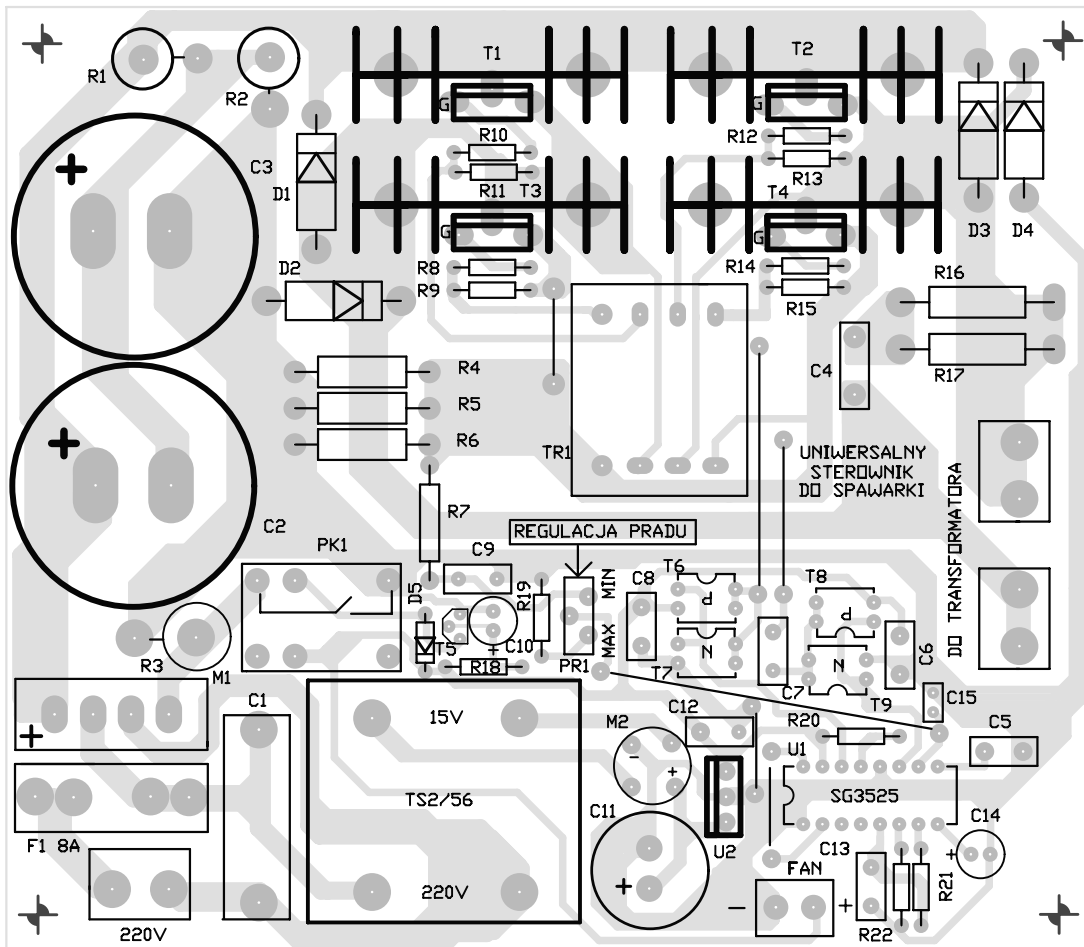
Włączenie tranzystora MOS sprowadza się w praktyce do naładowania pojemności bramka-źródło. W typowym MOSFET-cie (o parametrach 8A/400V) ta pojemność ma wartość około 1..1,5nF, a więc korzystając z drivera umieszczonego w U1 najprawdopodobniej udałoby się go wysterować.

Tranzystor o takich parametrach wystarcza jednak do budowy spawarki o mocy nie większej niż 1kW. Skoro kontroler ma być uniwersalny i dostarczać większej mocy, konieczne było rozbudowanie stopnia sterującego. Silne tranzystory MOS (o parametrach np. 20A/400V) mają bowiem pojemność bramka - źródło już przekraczającą 3nF! Ich sterowanie bezpośrednio z UC3525 mogłoby się nie udać.

Dlatego w układzie sterownika stopień wyjściowy został rozbudowany, a w zasadzie zdublowany. Na końcówkach 11 i 14 kontrolera dostępna jest para prostokątnych sygnałów o parametrach czasowych dokładnie takich, jakie potrzebne



Rys. 3. Kształt prądu przepływającego przez rezystor kontroli prądu (w układzie rzeczywistym na przednie zbocze impulsów nakładają się impulsy szpilkowe).



Rys. 4. Schemat montażowy urządzenia.

są do sterowania kluczy MOS i amplitudzie bliskiej napięciu zasilania kontrolera. Sygnały te wystarczy jedynie wzmacnić. W roli elementów realizujących tę funkcję pracują dwie pary tranzystorów MOS średniej mocy. Zasada działania drivera jest bardzo prosta - w chwili gdy napięcie sterujące (na przykład na końcówce 14) jest na poziomie wysokim, tj. około 12V, przewodzi tranzystor T7 (z kanałem N), a T6 (z kanałem P) jest zatkany. Gdy napięcie sterujące jest na poziomie niskim (bliskie 0V), to T7 jest zatkany, a T6 przewodzi. Takie sterowanie jest możliwe tylko w zastosowanej konfiguracji, a więc gdy MOSFET-y połączone są drenami (tak, że tworzą one wyjście), a źródła dołączone są odpowiednio do masy i zasilania układu.

Odwroćcie fazy sygnału sterującego przez dodatkowy driver nie ma szczęśliwie wpływu na działanie układu. Dzieje się tak dlatego, iż sterujące uzwojenie transformatora TR1 jest włączone pomiędzy oba wyjścia driverów. Szeregowo

włączony z uzwojeniem kondensator C7 o dużej pojemności odcina ewentualną składową stałą, która mogłaby popłynąć przez uzwojenie sterujące TR1 niepotrzebnie go magnesując. Łączny prąd przewodzony przez tranzystory drivera wynosi około 1A (oczywiście w krótkich impulsach), a więc zamiast dużych i drogich tranzystorów w obudowie TO-220 można z powodzeniem użyć elementów średniej mocy w obudowie DIP. Zresztą znacznie łatwiej jest kupić tranzystor z kanałem P w obudowie DIP niż w TO-220! Prawidłowa praca drivera wymaga starannego zblokowania zasilania dobrej jakości kondensatorami, pełniącymi rolę źródła energii na czas impulsu.

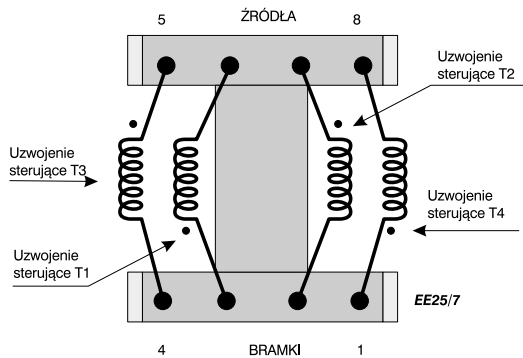
W kontrolerze spawarki układ UC3525 nie pełni zbyt ambitnej roli. Jego działanie sprowadza się do sterowania kluczami falownika ze współczynnikiem wypełnienia impulsów bliskim 50%, dopóki nie otrzyma on sygnału, iż przez klucze (a więc i na wyjściu) płynie prąd o założonym natężeniu. Od tej chwili kontroler zmniejsza sze-

rokość impulsów sterujących tak, aby osiągnięta została stabilizacja prądu. Nie ma natomiast potrzeby stabilizacji napięcia - w stanie rozwarcia wyjścia układu, a więc wtedy, gdy nie spawamy, osiąga ono maksymalną (określoną przez przekładnię transformatora impulsowego) wartość ok. 50V, co jest korzystne, jeśli chodzi o możliwość zapalenia łuku.

Jak wspomniałem, informacja o prądzie przewodzonego przez klucze pojawia się w postaci napięcia na równoległe połączonych rezystorach R4..R6. Napięcie to poprzez obwód (R7, C9) całkujący szpilkowe zakłócenia znajdujące się na przednim zboczku impulsu jest podawane na 10. wy-

wrowadzenie kontrolera. Potencjometr PR1 pozwala w razie potrzeby na dokładne wyregulowanie wartości prądu, choć rzadko bywa to konieczne i w zasadzie ustawia się go w położeniu górnym. Napięcie progowe wewnętrznych obwodów regulacji wynosi około 1V, znając przekładnię transformatora wyliczenie wartości rezystora kontrolującego prąd jest już sprawą prostą. Istnienie prądu magnesującego rdzeń transformatora impulsowego, z uwagi na jego niewielką wartość, można zaniedbać.

Do poprawnej pracy U1 wymaga dołączenia jeszcze kilku elementów biernych. Rezystor R22 wraz z kondensatorem C13 ustala częstotliwość pracy falownika na 40kHz, wartość pojemności kondensatora C13 wraz z R21 wyznacza z kolei wielkość czasu martwego, a więc minimalnego odstępu pomiędzy załączeniem jednej pary kluczy a drugiej. Wartość pojemności kondensatora C14 decyduje o opóźnieniu startu układu po włączeniu, a rezystor R20 ogra-



Rys. 5. Sposób nawinięcia transformatora sterującego - uzwojenia wtórne.

nicza prąd ładowania pojemności bramek w tranzystorach T6..T9 do wartości bezpiecznej dla układów zawartych w strukturze U1.

Montaż

Układ sterownika został zmontowany na jednostronnej płytce drukowanej o wymiarach 125x145mm. Montaż układu (według schematu z rys. 4) jest typowy i nie wymaga specjalnych uwag. Widok mozaiki ścieżek znajduje się na wkładce wewnątrz numeru.

Warto jest umieścić U1 w podstawie i na początku nie montować rezystorów R5 i R6, co pozwoli przetestować pracę układu na minimalnej mocy wyjściowej. Należy również zwrócić uwagę na dobre przymocowanie tranzystorów kluczujących do radiatorów - niezbędne jest posmarowanie powierzchni styku pastą silikonową.

Transformator TR1

Transformator sterujący tranzystorami mocy jest kluczowym elementem sterownika. Od jakości jego wykonania zależy powodzenie łatwego i szybkiego uruchomienia sterownika, toteż jego wykonaniu należy poświęcić wiele uwagi. Transformator zawiera pięć uzwojeń, każde z nich musi być odizolowane od innych. Ważne też jest prawidłowe podłączenie początków i końców uzwojeń. Ewentualne błędy dadzą w efekcie przebicia międzyuzwojeniowe lub niewłaściwą kolejność włączania tranzystorów - trzeba zatem uważać.

Do wykonania transformatora wykorzystany został popularny rdzeń typu EE25/7 Polferu z materiału F807 lub F2001 i karkas typu 2020. Pewnym problemem może być to, że wspomniany karkas ma jedynie 8 końcówek, a potrzeba 10. Niestety

Polfer nie produkuje karkasu do tej kształtki o większej liczbie końcówek i jakoś trzeba ten problem rozwiązać.

Do wykonania transformatora potrzebować będziemy jeszcze około 2 metrów drutu emaliowanego o średnicy około 0,3..0,4mm, nieco folii poliestrowej (ale nie biurowej taśmy przeźroczystej, nieodpornej na podwyższoną temperaturę) do izolowania, przydaje się też klej typu cyjanopan i żywica epoksydowa.

Pomocny w prawidłowym wykonaniu elementu będzie **rys. 5**.

Płytkę drukowaną została zaprojektowana w taki sposób, że nóżki karkasu będą podłączone do uzwojeń wtórnych transformatora. Pracę zaczynamy od nawinięcia w jednej warstwie 28 zwojów drutu, zaczynając od końcówki 4, a kończąc na 5. Na początek i końcówkę uzwojenia warto nałożyć centymetrowej długości koszulkę izolującą ściągniętą np. z dowolnego izolowanego przewodu. Dzięki temu unikniemy przebić pomiędzy końcówkami uzwojeń. Nawinięte uzwojenie izolujemy folią poliestrową (1..2 warstwy).

W taki sam sposób nawijamy kolejne trzy uzwojenia wtórne pilnując, aby nawijać je w tym samym kierunku, gdyż tylko wtedy zapanujemy nad uruchomieniem układu. Początki uzwojeń łączymy do końcówek odpowiednio 3, 2, 1, a końce do 6, 7, 8. Nawinięte starannie (i ciasno!) uzwojenia wtórne oczywiście izolujemy.

Do wykonania transformatora pozostało jeszcze nawinięcie uzwojenia pierwotnego. Ponieważ w karkasie nie ma już wolnych końcówek, konieczne jest podłączenie wyprowadzeń bezpośrednio do punktów lutowniczych na płytce drukowanej, zlokalizowanych po prawej stronie transformatora (widok z góry). Nawinięcie uzwojenia rozpoczynamy tak, aby początek drutu leżał dokładnie na środku dolnej części transformatora. Brak elementów mocujących może sprawić nieco kłopotów, dlatego po nawinięciu kilku zwojów (i umocowaniu końca zgodnie z **rys. 6**), warto jest umocować drut za pomocą małej ilości cyjanopan. Gdy po kilku sekundach klej wyschnie, można dowie-

nać pozostałą część uzwojenia i w podobny sposób zamocować koniec. Uzwojenie pierwotne liczy 30 zwojów tego samego drutu co poprzednio. Na szczęście, w przypadku uzwojenia pierwotnego rozmieszczenie początków i końców nie ma znaczenia. Na końce drutu naciągamy koszulkę izolującą i całość przykrywamy pojedynczą warstwą folii.

Przed przylutowaniem drutu do końcówek warto dokonać testów poprawności nawinięcia, co pozwoli uniknąć przykrych niespodzianek podczas uruchamiania urządzenia. W tym celu w karkas wkładamy rdzeń, ściskamy połówki za pomocą gumki recepturki lub koszulki termokurczliwej i mierzymy indukcyjność uzwojenia pierwotnego. W prawidłowo wykonanym transformatorze powinna ona przekraczać 1,5mH. W kolejnym kroku należy po kolei łączyć szeregowo uzwojenia wtórne i sprawdzać czy za każdym razem wypadkowa indukcyjność połączonych uzwojeń wzrasta.

Uruchomienie

Do uruchomienia sterownika potrzebne będą dwie żarówki 220V/100W, żarówka samochodowa 12V/10W, zasilacz warsztatowy o regulowanym napięciu i z ograniczeniem prądu, przydatny okaże się też oscyloskop.

Proces uruchomienia sterownika rozpoczynamy od wylutowania tranzystora T5 i podania z zasilacza warsztatowego napięcia 15V (z ograniczeniem prądu do około 0,5A) bezpośrednio na kondensator C11. Następnie kontrolujemy wielkość napięcia na C8 (12V) i pobór prądu przez układ (około 100mA). Gdy pobór prądu będzie duży (powyżej 200mA) wylutowujemy kondensator C7. Jeśli po wylutowaniu kondensatora pobór prądu spadnie do około 50mA, podejrzanym elementem staje się transformator i elementy dołączone do wtórnej strony TR1. Sprawdzenie transformatora jest możliwe po wylutowaniu rezystorów R8, R10, R12, R14. Pobór prądu nie powinien przekraczać 100mA.

Sprawdzamy również obecność na końcówce 16 U1 napięcia odniesienia o wartości 5V, fal prostokątnych na końcówkach 11 i 14 oraz na połączonych drenach par

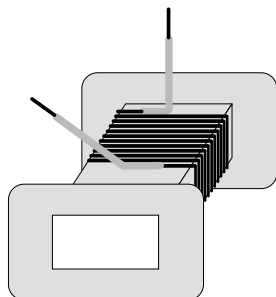
driverów. Następnie wlotujemy tranzystor T5 i kontrolujemy pracę układu sterowania przekaźnikiem. Po włączeniu zasilania przekaźnik powinien przyciągnąć kotwicę po upływie około 1,5 sekundy.

W następnym kroku łączymy ze sobą plusy kondensatorów C11 i C2 oraz przestawiamy zasilacz, aby był w stanie oddać prąd ok. 1,5A. Po włączeniu układu pobierany przez niego prąd nie powinien być większy niż 250mA. Gdy wartość ta jest większa prawdopodobnie zła jest kolejność pracy kluczy - na przykład T1 jest załączany razem z T3, a winowajcą jest TR1.

Dalej podłączamy do wyjścia sterownika żarówkę 12V/10W. W prawidłowo pracującym układzie powinna się ona jasno świecić. Jednocześnie zaobserwujemy zwiększony pobór prądu przez układ (rzędu 1A). Po chwili pracy sprawdzamy temperaturę tranzystorów kluczujących (mogą być jedynie lekko ciepłe). Jeśli dysponujemy oscyloskopem, można pokusić się o obejrzenie kształtu napięcia na wyjściu układu i sygnału na rezystorze R4. Prawidłowe przebiegi powinny być zbliżone kształtem do tych, jakie zamieszczone są na rysunkach.

Na zakończenie pozostaje jedynie sprawdzić zachowanie układu przy dużym napięciu zasilania oraz skontrolować poprawność pracy ograniczenia prądu, co jest niezwykle ważne z punktu widzenia późniejszej eksploatacji spawarki.

W tym celu przerywamy połączenie pomiędzy kondensatorami C11 i C2, odłączamy zasilacz warsztatowy, a do wyjścia sterownika podłączamy dwie szeregowo po-



Rys. 6. Sposób nawinięcia uzwojenia pierwotnego TR1. Dla uproszczenia nie zostały narysowane wcześniej nawinięte uzwojenia wtórne.

łączone żarówki 220V/100W. Po włączeniu sterownika do sieci powinny się zaświecić (niepełna jasność), układ powinien pracować cicho, a tranzystory kluczujące powinny być chłodne. Napięcie na szeregowo połączonych kondensatorach C2 i C3 powinno być zbliżone do 300V.

Sprawdzenie działania układu ograniczenia prądowego w zasadzie wymaga obciążenia sterownika pełną mocą, co niekiedy mogłoby być kłopotliwe - skąd wziąć kilowatowy rezystor?

Dlatego do prób, zamiast połączonych równolegle trzech rezystorów, trzeba użyć jednego o większej rezystancji, tak aby próg czułości układu przesunąć w dół. Gdy użyjemy rezystora o wartości około 5Ω, po obciążeniu sterownika wcześniej wspomnianymi żarówkami, powinniśmy zaobserwować zadziałanie zabezpieczenia. Układ powinien zacząć ograniczać współczynnik wypełnienia impulsów sterujących i przejść do stabilizacji prądu. W stosunku do poprzedniej próby jasność świecenia żarówek powinna być mniejsza. Gdy w trakcie pracy (uwaga na możliwość porażenia) dołączymy równolegle do wspomnianej rezystancji 5Ω wylutowany rezystor 1Ω, jasność powinna być ponownie większa. Podczas prób potencjometr dokładnej regulacji prądu musi mieć suwak w górnym położeniu.

W trakcie ograniczania prądu praca sterownika powinna być bezgłośna. Ewentualne piski świadczą o wzbudzaniu się układu i muszą zostać wyeliminowane. W razie takiego problemu przede wszystkim trzeba oscyloskopem sprawdzić kształt przebiegu napięcia na czujniku prądu R4. Charakterystyczne dla przedniego zbrocza sygnału impulsy szpilkowe muszą być ograniczone za pomocą dwójnika R7/C9 i kondensatora C15, wartości tych pojemności można próbować nieco (ale nie za dużo) zwiększyć. Podobnie jest z kompensacyjną pojemnością C5. Nie wolno jednak zmian pojemności dokonywać „w biegu”, czyli przy pracującym sterowniku, bo grozi to spalaniem kluczy MOS.

Robert Magdziak, AVT
trebor@mi.com.pl

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

PR1: potencjometr wielobrotowy 2,2kΩ
R1, R2: 68kΩ/2W
R3: 18..33Ω/5W drutowy
R4..R6: 1Ω/1W nie drutowy, patrz również tabela w drugiej części artykułu
R7: 1kΩ/0,125W
R8, R10, R12, R14: 22Ω/0,5W
R9, R11, R13, R15: 8,2kΩ/0,25W
R16, R17: 15kΩ/1W
R18: 560kΩ/0,125W
R19: 4,7kΩ/0,125W
R20: 47Ω/0,25W
R21: 33Ω/0,125W
R22: 3,6kΩ/0,125W

Kondensatory

C1: 0,1μF/400V
C2,C3: 470μF/200V
C4: 220pF/1kV ceramiczny
C5: 100nF/63V
C6, C8, C12: 220nF/63V
C7: 470nF/63V
C9: 2,2nF/63V
C10: 220μF/16V
C11: 470μF/35V
C13: 10nF/63V
C14: 1μF/25V
C15: 100pF/63V ceramiczny

Półprzewodniki

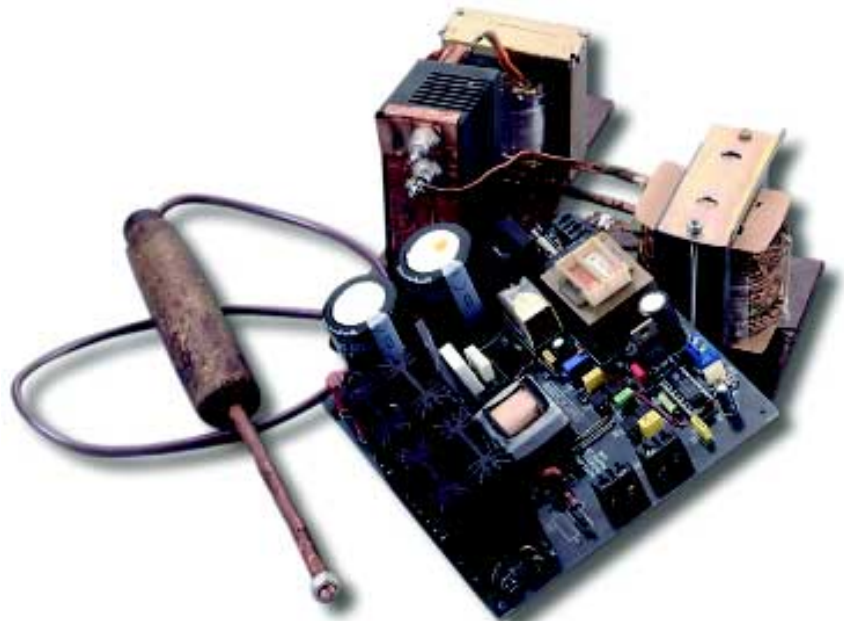
D1..D4: BYT13-600, MUR460 lub podobna (3A/600V/Trr<100ns)
D5: 1N4148
M1: mostek 10A/400V
M2: mostek okrągły 1A/50V
T1..T4: STP10N40 (1kW), STW18N40 (1,5kW), STW20N40 (2kW) (STMicroelectronics) lub odpowiedniki
T5: BS170
T6, T8: IRFD120 (International Rectifier) lub inny tranzystor MOS-N 1A/100V w obudowie Mini-DIP
T7, T9: IRFD9120 (International Rectifier) lub inny tranzystor MOS-P 1A/100V w obudowie Mini-DIP
U1: SG3525, nie musi być z literką „A” na końcu
U2: 78M12

Różne

F1: oprawka bezpiecznika do druku i bezpiecznik zwłoczny 10A
PK1: przekaźnik 12V typ OMRON G2K
TR2: transformator sieciowy TS2/56
TR1: transformator impulsowy do wykonania we własnym zakresie na rdzeniu EE25/7 z materiału F807 Polferu (bez szczeliny) i nawinięty na karkasie typu 2020, uzwojenia wg opisu w tekście
Podstawka pod U2, trzy złącza podwójne ARK7,5mm i jedno podwójne 5mm, cztery radiatorzy typu KS51, wentylator 12V/80 x 80 mm

Amatorska spawarka, część 2

AVT-837



W drugiej części artykułu zostanie zaprezentowany sposób wykonania transformatora impulsowego oraz pozostałych elementów strony wtórnej, a więc prostownika i dławika. Od początku urządzenie było projektowane tak, aby składało się z dwóch części: uniwersalnego sterownika impulsowego, wspólnego dla wszystkich konstrukcji, oraz charakterystycznych dla każdego wykonania elementów indukcyjnych. Dlatego w niniejszym artykule, oprócz opisu rozwiązania wykonanego przez autora, zostanie podana pełna metodologia przystosowania konstrukcji do własnych warunków (w szczególności innych magnetyków), co najczęściej sprawia kłopot konstruktorom.

Pofalowane i szybkozmienne napięcie wyprostowane sieci, jakie dostarcza układ sterownika impulsowego, musi być przetworzone (dla obniżenia napięcia do wartości wymaganej w procesie spawania) i wyprostowane (w założeniu chcemy bowiem spawać prądem stałym). Pierwszym elementem, podłączanym do strony wtórnej sterownika, jest transformator impulsowy. Jego zadanie jest proste - musi on obniżyć pierwotne 300V do około 45..50V, taka wartość napięcia jest wymagana do pewnego zapalenia łuku elektrycznego. Podczas spawania napięcie wyjściowe spawarki jest mniejsze, ale w opisywanym rozwiązaniu redukcji dokonuje układ ograniczenia prądu. Bez problemu można więc wyliczyć wartość przekładni $N=U_p/U_w = 6$.

Transformator

Rdzeń, jaki zdolny będzie przenieść żadaną moc, można wyselekcjonować z dobrego katalogu magnetyków (np. Philipsa) lub korzystając z coraz popularniejszego oprogramowania, łączącego w sobie cechy katalogu i kalkulatora (np. Siemens). Przy porównywaniu różnych kształtek zwracamy uwagę na parametr zastępczej objętości magnetycznej (V_e) - im rdzeń ma większe V_e , tym w przybliżeniu większą moc może przenieść i odwrotnie.

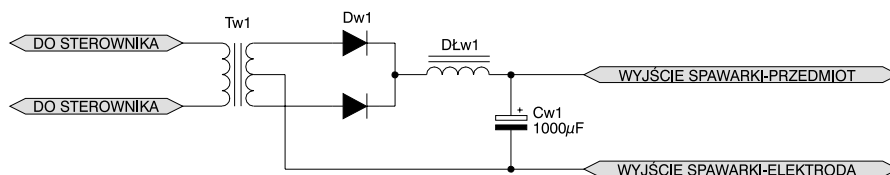
Oczywiście, danym z katalogów nie należy wierzyć bezkrytycznie - pamiętajmy, że podobnie jak w innych dziedzinach (np. mocy zestawów głośnikowych do samochodu lub komputera) podawane tam wartości parametrów są wyliczonymi i maksymalnie wyżyłowanymi wartościami, możliwymi do osiągnięcia w idealnych warunkach i przy nawijaniu rdzenia nadprzewodnikiem. Do danych katalogowych stosujemy zatem współczynnik wycucia inżynierskiego „k” o wartości 0,5..0,75 (w zależności od katalogu), przez który mnożymy odczytane graniczne wartości mocy. Wydaje się to nieco zagmatwane i dlatego dla osób, które nie opanowały jeszcze sztuki interpretacji podaję w tabeli dane pozwalające na zasadzie porównania dobrać coś nietypowego.

Do obliczeń przykładowych użyjemy rdzenia typu E65/28 (pozwalającego na przeniesienie maksymalnie 1,5kW) o katalogowych parametrach: L_e (długość skuteczna) 147mm, $V_e=80300\text{mm}^3$, $m_e=1700$ i $Al=7400\text{nH}/\text{zw}^2$. Ta kształtka powinna być oczywiście wykonana z materiału przeznaczonego do pracy z dużymi mocami. W przypadku kształtek produkcji jeszcze do niedawna istniejącego Polferu są to materiały F807 i F814, dla Philipsa oznacza to materiały 3C8, 3C85 lub nowy 3F3, z kolei od Siemens można zastosować materiały N67, N87 itp.

Zakupiony rdzeń trzeba niestety nawinać. Logiczne jest, że z uwagi na wyjątkową uciążliwość tej czynności oraz na wielkość strat mocy, liczba zwojów w każdym z uzwojeń powinna być jak najmniejsza. No to ile?

Odpowiedź jest prosta - tyle, aby rdzeń się nie nasycił od prądu magnesującego. Zapomnijmy przez chwilę, że jest to transformator i założmy, iż jest to zwykły dławik jednouzwojeniowy. Gdy taki dławik dołączymy do źródła napięcia, zacznie płynąć liniowo narastający prąd. W opisanym układzie, przy częstotliwości pracy falownika 40kHz będzie on płynąć przez maksymalnie $t=12,5\text{ms}$ (w praktyce nawet nieco mniej). Przy indukcyjności uzwojenia pierwotnego L maksymalna wartość prądu wyniesie więc $I_m=U*t/L$.

Jaka powinna być wartość tego prądu? Taka, aby wywoływana przez niego indukcja nie była większa niż ok. 40% maksymalnej. Ferryt typu F807 ma indukcję nasycenia rzędu 330mT, prąd magnesujący nie powinien jednak wywoływać w rdzeniu indukcji większej niż 100..150mT. Wielkość indukcji można wyliczyć ze wzoru $B=me*I*z/Le$, gdzie me to skuteczna przenikalność (dana z katalogu), I - prąd płynący przez uzwojenie - tu prąd magnesujący, z - liczba zwojów, a Le - to kolejny parametr rdzenia z katalogu. Dysponując tymi wzorami oraz pamiętając, że indukcyjność „z” zwojów wynosi $L=Al*z^2$, można obliczyć liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego.



Rys. 7. Schemat obwodu wyjściowego spawarki.

W rozwiązaniu autora uzwojenie pierwotne liczy 45 zwojów. Wtedy jego indukcyjność wynosi $L=15\text{mH}$, maksymalna wartość prądu wynosi więc $I_m=300\text{V}*12,5\text{ms}/15\text{mH}=0,25\text{A}$, a wielkość indukcji $B=1700*0,25\text{A}*45/147\text{mm}=130\text{mT}$. Rdzeń się więc nie nasyci. Gdy indukcja „wyjdzie” istotnie większą, trzeba zweryfikować założenia - na przykład zmienić typ rdzenia.

Liczbę zwojów uzwojenia wtórnego wyliczamy z przekładni zaokrąglając w górę $N_w=N_p/N=45/6=8$. Oczywiście wszystkie te obliczenia są mocno uproszczone, nie uwzględniają na przykład spadków napięć na diodach prostownika i rezystancji uzwojeń, ale praktyka wskazuje, że wszystko jest w porządku. O ile do zapalenia łuku potrzebne jest napięcie około 50V, to już podczas spawania wynosi ono nawet 20V.

Do ograniczenia strat mocy w prostowniku zastosowany został układ z podwójnym uzwojeniem wtórnym (dwa razy 8 zwojów) i dwiema diodami. Średnice drutów nawojowych wyliczamy korzystając z dopuszczalnej gęstości prądu dla miedzi w pracy przerywanej (mamy jeszcze wymuszone chłodzenie), a więc ok. 8..10A/mm². Przy mocy 1,5kW prąd płynący przez uzwojenie

pierwotne wyniesie około 1500W/300V=5A, a prąd po stronie wtórnej będzie sześciokrotnie większy. Nietrudno wyliczyć, że uzwojenie pierwotne powinno być nawinięte drutem o średnicy około 0,9mm, a przy uwzględnieniu efektu naskórkowego ok. 1mm. Z kolei uzwojenie wtórne wymaga drutu o przekroju min. 3mm², czyli o średnicy 2mm.

Jak widać, zgrubne szacunki uzwojeń transformatora wcale nie są skomplikowane. Zanim jednak zabierzemy się do pracy, warto jeszcze chwilę spędzić przy kalkulatorze i obliczyć, czy wspomniane uzwojenia uda się nawinać, tzn. czy w oknie rdzenia jest dostatecznie dużo miejsca. Dla rdzenia E65/28 typowy karkas oferuje ok. 400mm² miejsca przy szerokości nawijania 40mm. Uzwojenie pierwotne da się nawinać w dwóch warstwach - zabierze ono więc 2 razy 1mm+0,5mm na izolację - 120mm², a uzwojenie wtórne też będzie nawijane w dwóch warstwach o wysokości 2mm+0,5mm na izolację, a więc w sumie 200mm². Transformator da się zatem nawinać.

Prostownik

Kolejnym etapem budowy jest prostownik.

Do wyprostowania napięcia potrzebne są dwie szybkie diody prostownicze. Muszą one mieć dopuszczalne napięcie zwrotne min. 200V, dopuszczalny prąd ciągły 25A i czas rekombinacji nośników poniżej 200ns. Dla spawarki większej mocy oczywiście wymagania rosną.

Celowo podałem opis diody w postaci parametrycznej, a nie konkretnego, jednego typu, gdyż nie są to elementy tanie i często udaje się coś „dopasować”. W konstrukcji modelowej użyte zostały na przykład cztery (po dwie równolegle), już nieco „muzealne” diody typu 1N3891 (16A/600V/250ns), które udało mi się kupić z demontażu za 1zł/sztuka.

Tabela 1. Popularne kształtki ferrytowe Polferu i Philipsa i ich podstawowe parametry.

Kształtka	Ve	Le	me	Al/szczelina	indukcja nas.	materiał
E65/28	80300	147	1700	7400	330mT	F807/F814
E55/20	40200	125	1750	5900 - 0mm	330mT	F807/F814
			450	1600 - 0,25mm		
			280	1000 - 0,43mm		
			176	630 - 0,75mm		
			112	400 - 1,3mm		
			88	300 - 1,75mm		
M42/29 - kubkowy	18300	69	250	1250 - 0,15mm	360mT	F1001
			160	800 - 0,32mm		
			80	400 - 0,8mm		
			50	250 - 1,5mm		
ETD49	24000	114	1950	4200	330mT	3C85
ETD54	35500	127	1950	5000	330mT	3C85
ETD59	51500	139	1950	6000	330mT	3C85
U46x40x28	70000	180	2200	5300	330mT	F807/F814
U80x53x32	164000	280	2200	4500	330mT	F807/F814
TN33/20/11 - proszkowy	5200	80	80	82	1400mT	2P80 - ciemnozielony
			90	87	1600mT	2P90 - ciemnobrazowy

Tranzystory kluczujące i diody prostownicze są najdroższymi elementami potrzebnymi do wykonania spawarki. Przy ich kupnie należy uważać, gdyż z nie znanych mi powodów ceny u krajowych sprzedawców zachowują się przypadkowo - ta sama dioda MUR1660 (można ją wykorzystać łącząc dwie diody równolegle) w cenie Motoroli 1,05USD, w jednej znanej firmie kosztuje 3,5zł netto, w innej blisko 20zł (wcale nie myślę tutaj o Elfie!).

Diody prostownika trzeba przykręcić do solidnego kawałka radiatora, gdyż wydziela się w nich nawet 30W. Przy montażu warto zadbać, aby strumień powietrza z wentylatora opływał wspomniany radiator w możliwie największym stopniu.

Najbardziej zagadkowym elementem konstrukcji jest dławik wyjściowy. Mimo że na pozór wydaje się być elementem niepotrzebnym, jego rola jest istotna - jest on elementem układu ograniczenia prądu. Aby zrozumieć jego rolę w układzie, najprościej będzie wyjaśnić jak działa układ ograniczenia prądu wyjściowego.

Jak już wspominałem w pierwszej części artykułu, układ sterownika impulsowego ogranicza współczynnik wypełnienia impulsów sterujących kluczami, gdy prąd płynący przez klucze osiągnie określoną progową wartość, np. 5A. Gdyby w układzie nie było dławika, ewentualne zwarcie po stronie wtórnej (np. dla zapalenia łuku) przeniosłoby się przez transformator (również jako zwarcie) na stronę pierwotną. Nawet gdyby układ sterownika natychmiast (co oczywiście nie jest możliwe) zareagował na to zdarzenie i zaczął ograniczać współczynnik wypełnienia, to i tak prąd płynący przez klucze nie zostałby ograniczony. Ograniczenie współczynnika wypełnienia impulsu nic tutaj nie pomaga - nadal amplituda napięcia przykładanego do transformatora wynosi ok. 300V, tyle że trwa ono przez krótszy czas.

Dławik umieszczony na wyjściu rozwiązuje ten problem. Nawet gdy wyjście zostanie zwarte, jego indukcyjność spowolni narastanie prądu tak, że układ kontroli będzie miał szansę prawidłowo zareagować. Dodatkowym zyskiem

Tab. 2. Zmiany niektórych elementów kontrolera w zależności od wersji mocowej.

Ozn.	1kW	1,5kW	2kW
T1...T4	STP10N40	STW18N40	STW20N40
R4,5,6	łącznie 0,3	łącznie 0,2	łącznie 0,15
C2,3	220m	470m	470m
C4	220p	220p	330p
R8,R10, R12,R14 Dlw1	22 min. 30mH/25A	22 min. 20mH/35A	18 min. 18mH/45A
Dw1	25A/200V	35A/200V	45A/200V
Trw1	E55	U46/E65	E65

jest to, iż wygładza on istotnie tętnienia wyprostowanego napięcia wyjściowego, dając w efekcie bardziej stałe napięcie wyjściowe.

Umieszczony na wyjściu kondensator elektrolityczny jest elementem opcjonalnym, gdyż układ działa prawidłowo i bez tego elementu. Jego obecność w układzie przydaje się jednak w momencie zapalania łuku, a więc wtedy, gdy pocieramy elektrodą o spawany element. Zgromadzona w pojemności energia pomaga w zapaleniu łuku, zwiększając chwilową wydajność prądową spawarki.

Do wykonania dławika najlepiej jest użyć rdzenia ze sproszkowanego żelaza. Takie rdzenie wykonuje się w formie pierścieni powleczonych poliamidem i powszechnie używa jako wysokoprądowych dławików w zasilaczach impulsowych (np. od PC-ta). Zaletą takiego materiału magnetycznego jest bardzo wysoka indukcja nasycenia rzędu 1400mT (ferryt ma tę wartość na poziomie 300...400), przez co nawet potężny dławik jest niewielki. Na rdzeniu TN33/20/11 Philipsa (liczby określają średnicę zewnętrzną, wewnętrzną i grubość w milimetrach) z materiału 2P80 (Al=82, me=80, Le=80mm, Bmax=1400mT, kolor ciemnozielony) wystarczy nawinąć 16 zwojów drutu DNE1,8mm i dławik gotowy. Wymaga on jednak chłodzenia wymuszonego - drut nawojowy jest dość cienki, ale grubszym nie uda się nawinąć rdzenia pierścieniowego.

Gdy nie mamy dostępu do nowoczesnych magnetyków, trzeba zaakceptować krajowy ferryt. Rdzeń E55/20 z materiału F807 lub F814 ze szczeliną powietrzną 1,75mm (Al=300) będzie miał na tyle duży zapas, że można zwiększyć nieco indukcyjność dławika (z około 20mH do 30mH) i średnicę przewodu nawojowego. Nawijamy

w tym przypadku 10 zwojów bifilarnie dwoma drutami 1,8..2mm. Gdy nie dysponujemy rdzeniem ze szczeliną, w tym przypadku można ją wykonać poprzez włożenie przekładek pod kolumny boczne. Aby jednak zrobić to prawidłowo, trzeba kontrolować indukcyjność dławika miernikiem RLC - praktycznie stwierdzono, że określenie grubości podkładek jest mało dokładne.

Montaż mechaniczny i uruchomienie całości

Część transformatorowo - prostownikową należy zmontować na odpornej na podwyższoną temperaturę podstawie. Całość wraz z kontrolerem zamykamy w metalowej obudowie, przez którą powinno przepływać tłoczone przez wentylator powietrze.

Do prób urządzenia przydaje się żarówka 12V/21W, którą należy włączyć szeregowo pomiędzy kontroler a pierwotne uzwojenie

WYKAZ ELEMENTÓW

dla układu transformatorowo - prostownikowego (1,5kW)

Trw1 - transformator impulsowy do samodzielnego wykonania na rdzeniu E65/28 Polfer z materiału F814 (F807) i karkasem typu 1187. Uzwojenie pierwotne 45 zwojów drutu DNE 1mm w dwóch warstwach. Uzwojenie wtórne 6 + 6 zwojów (odczep pośrodku) drutem DNE2mm w dwóch warstwach.

Dw1, Dw2 - dioda prostownicza 25A/200V/trr<200ns np. MUR3040 lub dwie MUR1620 połączone równolegle,

Dlw1 - dławik 20...30mH/35A, rdzeń E55/20 F807/F814 ze szczeliną 1,75mm (Al=300) i karkasem 1186. Uzwojenie - 10 zwojów dwoma drutami DNE1,8..2mm.

C1w - 1000mF/63V

transformatora impulsowego. Podczas pierwszej próby pełni ona rolę bezpiecznika chroniącego przed uszkodzeniem klucze sterownika. Po włączeniu układu nie powinniśmy zaobserwować żadnych negatywnych zjawisk i oczywiście wspomniana żarówka nie powinna się świecić. Sprawdzamy wartość napięcia wyjściowego - powinno przekraczać 45V. Na koniec zwieramy wyjście układu dołączając do zacisków wyjściowych kawałek (20mm) cienkiego

drutu miedzianego (0,5mm, np. telefoniczny) trzymany w pence. Drut powinien oczywiście natychmiast spłonąć. Potem zostaje jedynie usunięcie żarówki - bezpiecznika i ewentualna próba zapalenia łuku z drutem stalowym 1mm.

Uwaga! Przy wszelkich próbach z łukiem elektrycznym i późniejszym spawaniem należy bezwzględnie i skutecznie chronić oczy przez promieniowaniem ultrafioletowym i wysoką jasnością łuku. Jako za-

bezpieczenie minimalne wymagane jest spoglądanie przez ciemne szkło spawalnicze. Pamiętajmy również, że łuk elektryczny jest źródłem wysokiej temperatury, a iskry przyskające z elektrody mogą zapalić niektóre przedmioty, a nawet zniszczyć podłogę. Rozwaga, odpowiedzialność i brak pośpiechu są cechami tak samo niezbędnymi do uruchomienia urządzenia jak i miernik uniwersalny.

**Robert Magdziak,
trebor@mi.com.pl**