

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.

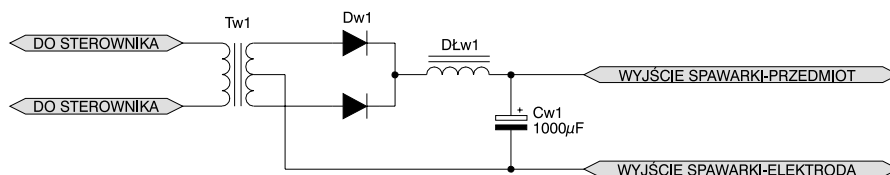
Oczywiście, danym z katalogów nie należy wierzyć bezkrytycznie - pamiętajmy, że podobnie jak w innych dziedzinach (np. mocy zestawów głośnikowych do samochodu lub komputera) podawane tam wartości parametrów są wyliczonymi i maksymalnie wyżyłowanymi wartościami, możliwymi do osiągnięcia w idealnych warunkach 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 Siemensu 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. $8..10\text{A}/\text{mm}^2$. 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. 3mm^2 , 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. 400mm^2 miejsca przy szerokości nawijania 40mm. Uzwojenie pierwotne da się nawinać w dwóch warstwach - zabierze ono więc 2 razy $1\text{mm}+0,5\text{mm}$ na izolację - 120mm^2 , a uzwojenie wtórne też będzie nawijane w dwóch warstwach o wysokości $2\text{mm}+0,5\text{mm}$ na izolację, a więc w sumie 200mm^2 . 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 wspomniałem 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 - prostownicową 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 pensecie. 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 pryskające 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**