

# Niekonwencjonalny regulator mocy

## kit AVT-479

*Prezentowany w artykule regulator mocy dla obciążeń rezystancyjnych (żarowych) wprawdzie steruje mocą synchronicznie z fazą sieci, ale w sposób odmienny od układów zmieniających kąt zapłonu triaka lub tyrystora. Otóż, przy niepełnej mocy dostarczanej do obciążenia, występuje dwukrotny przepływ prądu przez włókno żarówki w jednym półokresie (czterokrotnie w okresie sieci) - stąd częstotliwość jednokierunkowego (bo wyprostowanego) prądu wynosi 200Hz. Elementem kluczującym prąd żarówki jest tranzystor polowy z izolowaną bramką - MOSFET.*

Do poprawnej pracy regulatora konieczne jest bezpośrednie zasilanie go z sieci 220..240V. Typowo regulatory bywają włączane szeregowo z obciążeniem, co jest wygodne (często konieczne), zwłaszcza w domowych instalacjach górnego oświetlenia, w których nagminnie brak w puszkach pod włącznikiem przewodu zerowego. Regulatory te mają jednak tę wadę, że zwykle nie daje się zmniejszać jasności do zera. Przyczyna leży w sposobie włączania triaka (ewentualnie tyrystora), wymagającego kilkudziesięciu miliamperów prądu niezbędnego do podtrzymania jego przewodzenia.

Ograniczenie dostarczanych mocy od góry jest naturalne i wspólne dla obu typów elementów wykonawczych (moc maksymalna jest funkcją dopuszczalnego prądu i/lub możliwości skutecznego odprowadzania ciepła). Natomiast wymaganie zapewnienia pewnego minimalnego obciążenia regulatora bierze się z samej zasady działania elementów czterołączkowych: tyrystorów, triaków i diaków.

Jeśli nawet użyje się nowoczesnych, wysokoczułych elementów regulacyjnych (pojedyncze mA prądu bramki!), to w szeregowej konfiguracji pracy, w której wykorzystuje się część napięcia dla komparatora obwodu przesuwnika fazy, nie można stosować żarówek o mocy mniejszej od 60..40W.

Dla tego regulatora dolnych ograniczeń mocy po prostu nie ma. Można podłączyć szereg miniaturowych lampek (np. choinkowych) albo nawet neonówki. Jeśli funkcja regulacji jasności świecenia nie byłaby priorytetowa (ewentualnie sporadycznie potrzebna), to oferowana możliwość „miękkiego startu“ zawsze zapobiegnie przepalaniu się żarówek (powolny wzrost napięcia na obciążeniu od

zera do maksimum w ciągu 1..2 sekund, każdorazowo po włączeniu zasilania).

Opisywany regulator wymaga zewnętrznego okablowania (4 przewody: 2 na żarówkę i 2 zasilające), co w kategorii np. stołowych źródeł światła o niewielkiej mocy (do 200W) ma już drugorzędne znaczenie. Dwuzaciskość konwencjonalnych regulatorów okaże się rzeczywistą zaletą w pozostałych przypadkach.

Sam od dawna używam profesjonalnego panelu sterownika fazowego typu NS63 (z optoizolacją) o mocy 2kW. Ma on fabrycznie rozdzielone (osobne) zaciski zasilania i wyjściowe. Umożliwia zwykłym triakiem TIC2530 redukować Uwyj do wartości kilkunastu woltów RMS - blisko progu świecenia wolframowego włókna. Jednak mimo pozornego zgaszenia żarówki płyną przez nią wąskie impulsy (szpilki) prądu, które oprócz oczywistych strat mocy stanowią źródło zakłóceń wprowadzanych do sieci (wyłącznik jest więc nadal potrzebny!). Związane ze znacznym zapasem mocy gabaryty regulatora (produkcji byłej NRD), powiększone o moduł złożonej elektronicznej regulacji własnego pomysłu - czynią zeń całkiem spore pudło. Do zasilania lampki nocnej, kinkietu, oświetlenia biurka (i innego miejsca do pracy lub wypoczynku) przydałoby się coś poręczniejszego. To coś stanowi przedmiot niniejszego opracowania.

Przed opisem układu, warto jeszcze wspomnieć, iż tranzystor MOSFET jest niewrażliwy na ekstremalnie szybkie narastanie napięcia między drenem a źródłem - parametr dość ważny i newralgiczny dla triaków, które można przecież także załączyć (zapalić) przy dużej szybkości narastania tego napięcia, bez impulsu inicju-



### Zasada regulacji

Schemat ideowy z rys. 1 stanie się bardziej zrozumiałą, jeśli podczas jego analizy skupimy się początkowo tylko na obwodzie realizującym samą regulację mocy doprowadzanej do żarówki, z pominięciem wszystkich funkcji dodatkowych.

W tym zasadniczym torze (ujętym na schemacie w ramkę) znajdują się tranzystory T1, T2, T3 i inwertery B4 i B5, wraz z kilkoma rezystorami i potencjometrem. Dwupołkowo wyprostowane napięcie sieci - przez dzielnik: R4 + R5 oraz potencjometry POT i R7 - jest podawane na bramkę tranzystora P-MOS T1. T1 i T2 tworzą przerzutnik Schmitta o niewielkiej histerezie 50mV (tę wartość ustala rezystor R12). Sygnał z kolektora T2 jest podawany na wejścia dwu równoległe połączonych inwerterów B4 i B5. Równoległy układ B4 + B5 służy podwojeniu wydajności prądowej i szybszemu przeładowaniu pojemności bramka - źródło MOSFET-a T3. Jest to celowe, zważywszy że pojemność ta sięga 1000pF.

Wykonawczy MOSFET T3 kłucze prąd żarówki. Czas przewodzenia (zwarcia klucza) ustalamy potencjometrem POT, którego jeden koniec ma stały potencjał 0,7V, narzucony spadkiem napięcia na złączu baza - emiter T4. Tym tranzystorem zajmujemy się za chwilę. Na razie wystarczy wiedzieć, że w całym zakresie regulacji T4 pozostaje nasycony, a wpływ napięciowego współczynnika termicznego złącza B-E T4 (minus 2,2mV na stopień Celsjusza) kompensuje dioda D6, włączona szeregowo z DZ2. Każda dioda Zenera o napięciu zbliżonym do 6,5V wykazuje wyśmienite parametry stało- i zmiennoprądowe (najmniejsza rezystancja dynamiczna - poniżej 20Ω - i prawie zerowy dryf temperaturowy).

Im mniejszą rezystancję zadamy potencjometrem, tym większy będzie podział napięcia sieci i tym później na zboczach każdej połowki sinusoidy nastąpi odcięcie T1, nasylenie T2 i wyłączenie T3. Teraz, jeśli rezystancja ścieżki POT osiągnie pewną wartość minimalną (dobraną R7), T1 będzie przewodził w całym okresie sieci, a przez żarówkę popłynie prąd

znamionowy. Histereza przerzutnika zaznacza się tylko dla jasności żarówki zbliżonej do maksymalnej, kiedy wyłączenie T3 następuje w pobliżu samego ekstremum sieci. Przebieg rzeczywistej sinusoidy sieci energetycznej jest z reguły silnie odkształcony, co powodowałoby kilkakrotne przełączenia przerzutnika i klucza T3, co z kolei, prócz generowania większych zakłóceń, byłoby przyczyną wzrostu strat mocy T3.

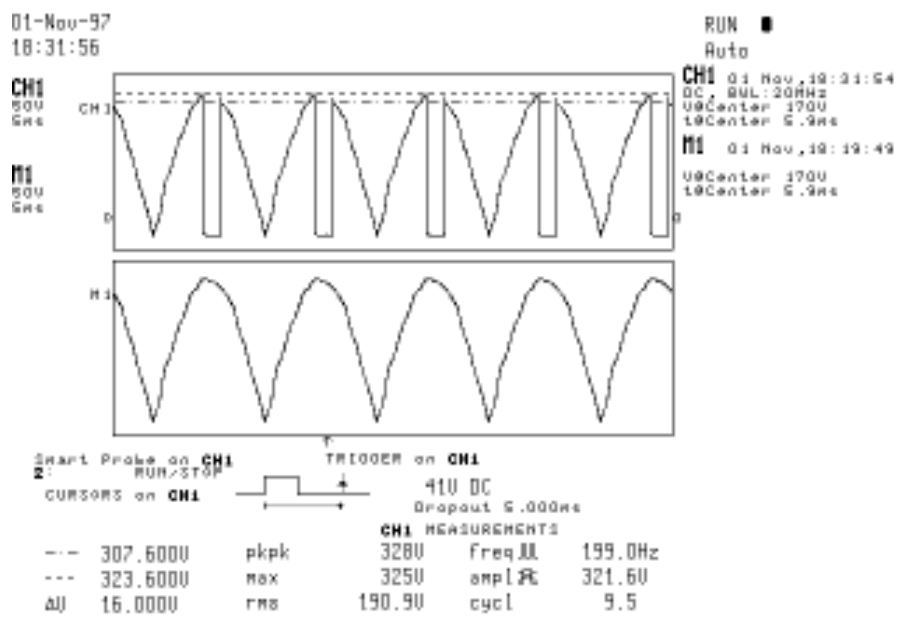
Może warto wspomnieć, iż T3, gdyby przełączał nieskończenie szybko, pozostawałby chłodny dla tych obciążeń. W realnych warunkach większość cieplnych strat mocy klucza powstaje podczas samego przełączania, kiedy napięcie na drenie dąży w kierunku jednego ze stabilnych poziomów. W sumie więc, o temperaturze T3 decydują mikrosekundy.

Ale powracamy do histerezy przerzutnika T2 + T3. Jej efektywna wartość wynosi 5..10V, bo wspomniane 50mV należy pomnożyć przez współczynnik podziału dzielnika napięcia, z którego sterowana jest bramka T1. Dobrze to widać na oscylogramie z rys. 2, przedstawiającym pracę regulatora na niemal pełnej mocy. Między widocznymi w górnej części rysunku poziomymi liniami - kursorami pomiarowymi - oscyloskop wskazał 16V i jest to właśnie szerokość histerezy. Pomiaru dokonałem dla wartości

R12 dwukrotnie większej od obecnie przyjętej. Gdyby zaobserwować ten sam przebieg w dziedzinie czasu (a nie amplitudy), to okaże się, że narzucona histereza nie pozwala na krótszy od 1ms czas wyłączenia T3. Obok mniejszych strat mocy (T3 nie potrzebuje wszak radiatora) mamy węższe widmo zakłóceń.

Dla małych jasności, kiedy wartość nastawionej rezystancji potencjometru jest bliska maksymalnej, współczynnik podziału dzielnika jest niewielki i efektywna szerokość histerezy również nieznaczna - poniżej 1V.

Kształt napięcia na żarówce dla tego przypadku pokazuje oscylogram z rys. 3. Szybkość narastania (i opadania) napięcia w pobliżu zera sieci jest duża, dlatego większa (a nawet jakakolwiek) histereza w tym zakresie regulacji nie jest potrzebna. Amplituda szpilek na obciążeniu sięga kilkudziesięciu woltów, co przy tym kształcie przebiegu daje napięcie skuteczne na poziomie kilkunastu V. Przebieg z rys. 3 został zdjęty dla rezystora R6 o wartości 47kΩ. R6 decyduje o minimalnej mocy, poprzedzającej całkowite wyłączenie T3 (stan wysoki na wyjściu B1 - PIN2). Kilkanaście woltów napięcia skutecznego pozwala ledwie jarzyć się włóknu żarówki 60-W, lub świecić już wyraźnie żarówce 150-W. Rezyg-



Rys. 2. Wpływ histerezy przełączania przerzutnika T2+T3 na kształt napięcia wyjściowego.

nując całkowicie z wlotowania R6 osiągamy pojedyncze wolty, a przez żarówkę płynie początkowo prąd poniżej progu jej świecenia.

### Jak działa obwód zabezpieczenia nadprądowego?

W obwodzie źródła T3 jest umieszczony czujnik prądu R20 (0,22Ω). Gdy chwilowa wartość napięcia przekroczy na nim 0,6V, to nasyci się T7 i na wejściu inwertera B3 (PIN5) wystąpi stan niski L. Na wyjściu B3 (PIN6) stan H przez rezystor R22 podtrzyma przewodzenie T7, co oznacza już stan stabilny. Wyjście B3 jest połączone z rezystorem R14 i diodami D3 i D4. Stan H przedostanie się przez R14 na B4, B5 wyłączając T3. Prąd zostanie natychmiast przerwany, co powinno ocalić T3 i mostek M1. Poprzez diodę D3 będzie wymuszone na R10 i bazie T4 prawie pełne napięcie zasilania. Napięcie na emiterze T4 z 0,7V wzrośnie do 7V i odetnie T1. Przez R13 popłynie prąd bazy T2, co dodatkowo „usztyni” stan H na wejściach B4 i B5. Bramka tranzystora T8 uzyska potencjał bliski napięciu źródła i otworzy się droga dla prądu diody świecącej LED MIN. Po chwili LED MIN zacznie migotać, gdyż jest kluczowana tranzystorem N-FET T9, sterowanym z kolei przebiegiem 1Hz z generatora zbudowanego na elementach B2, R18 i C6. Na pracę generatora pozwoli D4, spolaryzowana zaporowo. Konfiguracja T8 i T9 odpowiada funkcjonalnie bramce AND, niemożliwej do zrealizowania w równie prosty sposób na innych elementach. Aby skasować uaktywnione zabezpieczenie (spowodowane np. przepaleniem się żarówki, co często poprzedza zwarcie na krótko włókna) wystarczyłoby wyłączyć i ponownie włączyć zasilanie regulatora. Jest jednak inny sposób: trzeba gałkę potencjometru skrócić w położenie minimum. Wówczas wejście B1 (PIN1) uzyska poziom niższy od połowy Uzas, a jej wyjście poziomem H wprowadzi w stan przewodzenia T6, który przez diodę Schottky'ego D5 zewrze bazę T7. T6 po prostu przerwie pętlę sprzężenia zwrotnego przerzutni-

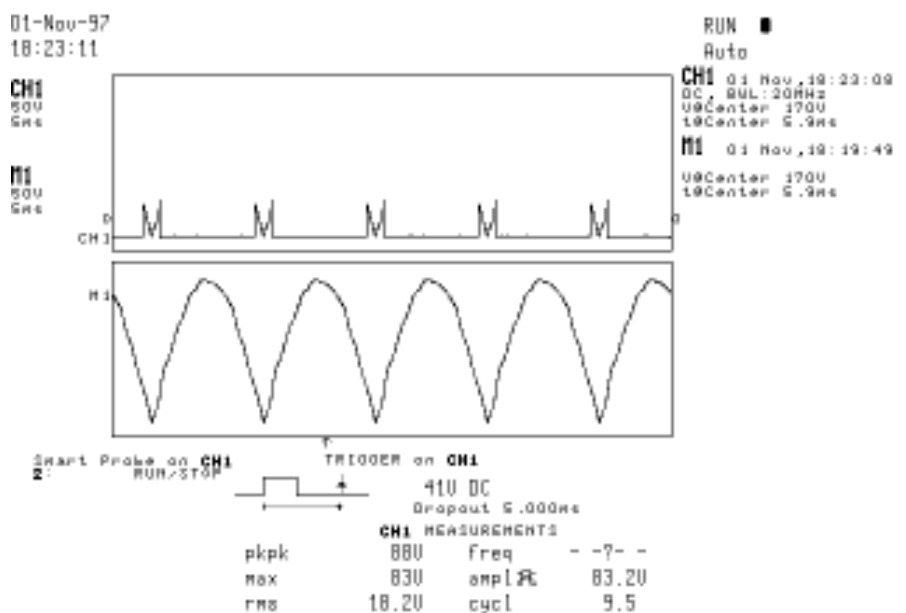
ka B3 + T7. Dioda D5 zapewnia właściwą polaryzację kolektora T6 i uniemożliwia pracę inwersyjną tego tranzystora. Przycisk monostabilny STOP, równoległy do T7, pozwala bezpiecznie przetestować działanie zabezpieczenia (w układzie występują napięcia sieci i wszelkie manipulowanie pęsetą przy T7 jest niedopuszczalne).

### Jak działa obwód miękkiego startu?

Zrealizowałem go na tranzystorze P-MOS T5. Wstępnie założymy, że przełącznik SW1 znajduje się w pozycji NORMAL. Po załączeniu zasilania kondensator C3 jest rozładowany (zwierając wyprowadzenia drenu i bramki T5). W takim razie napięcie między źródłem a drenem jest równe napięciu progowemu T5, które dla BS250 wynosi 2,5V. Zatem na drenie mamy 7,5V-2,5V=5V. Wtórnik emiterowy T4 przenosi ten potencjał na potencjometr i powoduje odcięcie T1, a w efekcie T3. Żarówka nie świeci. Kondensator C3 zaczyna się ładować przez rezystor R15. Proces przebiega powoli (mimo ostrej charakterystyki wejściowej T5), dzięki silnemu ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu realizowanemu przez C3. W efekcie napięcie drenu T5 (i bazy T4) obniża się płynnie, co skutkuje równie płynnym wzrostem jasności żarówki.

### Jak działa obwód opóźnionego wyłączenia światła?

Jest i taka, bardzo przydatna funkcja. Jak bardzo? - Niech każdy wyobrazi sobie, że po spędzeniu wieczoru przy biurku chce opuścić pokój. Żeby podchodząc do drzwi nie robić tego po omacku, musi wpiery zapalić górne światło, wrócić do stołu, zgasić lampkę i dopiero wychodząc, wyłączyć górne oświetlenie. Taka jałowa czynność, często powtarzana, może być nużąca. Opcja opóźnionego wyłączenia światła powoduje, że po wciśnięciu SW1 (pozycja TIMER na schemacie i płytce) przez 10 sekund nie dzieje się pozornie nic, poza migotaniem LED TIMER. Potem w ciągu kilkunastu sekund światło zostaje ściemnione do zera i T3 przechodzi w stan odcięcia, co zaobserwujemy płynnym naswietleniem diody LED MIN, która będzie przygasać w rytm błysków LED TIMER. Cały potrzebny do tego obwód to przełącznik SW1, dioda pulsująca LED TIMER, tranzystor T11 typu BF245A (indeks A oznacza mały prąd nasycenia Idss) i R11. Te cztery elementy współpracują ze znanym już T5. SW1 w pozycji TIMER zdejmuje plus z R15. C3 rozładowuje się w czasie ustalonym przez mikroskopijny prąd 200nA źródła prądowego T11, R11. Przeciwników stosowa-



Rys. 3. Kształt napięcia na żarówce dla małych jasności świecenia.

nia tranzystorów BF245 informuje, że bez T11 podobny czas rozładowania C3 wymagałby parokrotnego powiększenia R11 (do wartości nieosiągalnej w handlu). Można oczywiście, celem uzyskania dużych stałych czasowych, stosować kondensatory elektrolityczne, lecz nie zawsze jest to dopuszczalne (praca bipolarna) albo zalecane (upływności, wysychanie).

### Jak działają obwody sygnalizacji poziomu jasności?

Działanie LED MIN właściwie już omówiłem przy opisie pozostałych, licznych możliwości regulatora. Tu kluczową rolę pełni druga sekcja potencjometru, przyłączona do B1. Natomiast funkcja spełniana przez LED MAX jest czysto informacyjna i jeśli ktoś chciałby zaoszczędzić pięć elementów, może to zrobić nie wlotowując D7, C5, R16, T10 i LED MAX (a PIN13 inwertera B6 zerwać kropłą cyny z PIN14 U1). LED MAX zapala się po tym, jak C5 przestaje być doładowywany dodatkimi impulsami z kolektora T2.

Pełne otwarcie T3, czyli pełna moc, oznacza brak impulsów ujemnych na jego bramce i, oczywiście, brak dodatnich na kolektorze T2 i anodzie D7. Dopóki regulator pracuje na niepełnej mocy, impulsy te doładowują C5 i LED MAX jest wygaszony.

W układzie występuje kilka wartości napięć stałych, mierzonych względem PIN7 (nóżka masy) U1. Na C1 270V. Na C2 (plus zasilania U1) 7,5V. Pozostałe napięcia zależą od aktualnego stanu regulatora. I tak, gdy SW1 jest w pozycji NORMAL oraz żadna z diod LED nie świeci się, na katodach DZ1 i DZ3 mamy 20V. Kiedy świeci jedna z diod czerwonych MIN /MAX, napięcie w tym punkcie spada do ok. 17V. Dioda DZ3 jest wyłącznie po to, by pomóc w przytkaniu LED MIN /MAX w czasie przewodzenia LED TIMER. Ta ostatnia powinna być raczej koloru zielonego, ponieważ zielone pulsujące diody LED lepiej spełniają swoje zadanie przy małych prądach.

### Montaż i uruchomienie

Schemat montażowy przedstawiono na rys. 4. Różni się on w paru szczegółach od układu ze zdjęcia o dobudowany w ostatniej chwili obwód opóźnionego gaszenia żarówki. Przy okazji udało się zoptymalizować przebieg ścieżek, co spowodowało wyeliminowanie wszystkich zwór.

Potencjometr POT i przełącznik SW1 można wlotować w płytce. Będzie to ostatecznie zależało od zastosowanej obudowy. Regulator nie zmieści się w ściennej puszcze podtynkowej, ale nie do tego był przewidziany. Wymaga osobnej, izolowanej obudowy. Jej

wysokość uwarunkuje głębokość wlotowania w płytce diod świecących. Byłoby dobrze użyć diod o średnicy soczewki 5mm z uwagi na większą wytrzymałość na napięcia (względny bezpieczeństwa!). Do obudowy dochodzi zwykły przewód sieciowy (zasilanie) i odchodzi drugi (obciążenie), zakończony gniazdem na wtyczkę lampki. W obudowie można umieścić

### WYKAZ ELEMENTÓW

#### Rezystory

moc 0,125W (z wyjątkiem R0 - R5, R20, R24, R25)

- R0: R/0,5W
- R1: 2,2kΩ/0,5W
- R2, R3: 47kΩ/0,5W
- R4, R5: 270kΩ/0,25W
- R6: 47kΩ - opcjonalnie
- R7: otencjometr montażowy 10kΩ, pionowy
- R8, R13, R14, R19: 33kΩ
- R9, R10, R22, R23: 8,2kΩ
- R11: 10MΩ
- R12: 270Ω
- R15..R18: 1MΩ
- R20: 0,22Ω/3W
- R21: 2,2kΩ
- R24, R25: 1MΩ/0,25W
- POT: potencjometr 2 x 47kΩ/B (wykładniczy)

#### Kondensatory

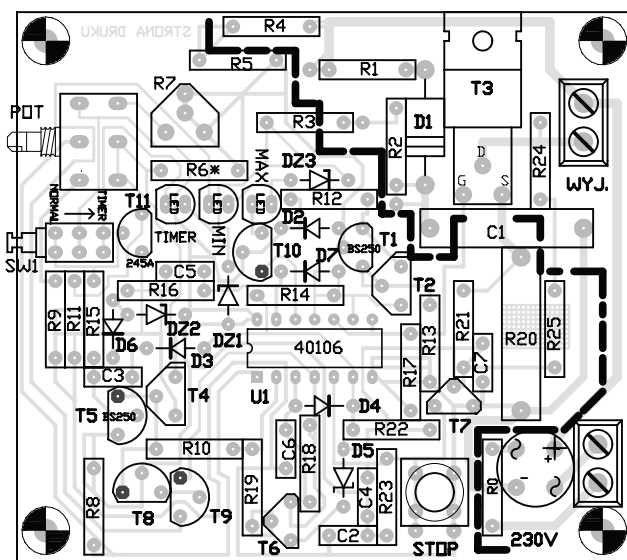
- C1: 220nF/400V
- C2, C3, C6: 1000nF/63V
- C4: 68nF/63V
- C5: 22nF/63V
- C7: 1nF/63V

#### Półprzewodniki

- U1: CD40106
- T1, T5: BS250
- T2: BC557
- T3: IRF840
- T4: BC557C
- T6, T7: BC547
- T8, T9, T10: BF245 (grupa B lub C)
- T11: BF245A
- D1: 1N4007
- D2, D3, D4, D6, D7: 1N4148
- D5: dioda Schottky'ego np. BAT85
- DZ1: Zener C13V/0,4W
- DZ2, DZ3: Zener C6V8/0,4W
- M1: mostek Graetza 1,5A/400V
- LED MIN /MAX: diody LED jasne, przezroczyste φ5mm
- LED TIMER: dioda LED pulsująca, zielona φ5mm

#### Różne

- SW1: przełącznik bistabilny 6PIN, miniaturowy



Rys. 4. Rozmieszczenie elementów na płytce drukowanej.

wartość, by położenie suwaka potencjometru odpowiadała jasności nieco poniżej maksymalnej i - co ważne - na stabilnym poziomie.

Ustawienie R7 jest uciążliwe, bo już niewielkie zmiany rezystancji powodują znaczne przyrosty mocy. Jeśli ktoś chce, może zmierzyć ustawioną wstępnie wartość rezystancji R7 i tak dobrać opornik pomocniczy, aby poszerzyć użyteczny zakres regulacji R7.

Wszystkie stany układu szczegółowo przedstawiłem już wcześniej, dlatego nie powinno być żadnych kłopotów z usunięciem ewentualnych błędów monta-

wych. Okazji do ich zrobienia zresztą nie ma za wiele, ponieważ w układzie brak kondensatorów polarnych, a wszystkie tranzystory montujemy zgodnie z rysunkiem obudów na płycie. Emitery tranzystorów bipolarnych są zaznaczone małym ścięciem w rogu zarysu obudowy, a dwa tranzystory p-n-p T2 i T4 odróżniają się nawet kształtem (jednak nie przypominającym ich rzeczywistego wyglądu. Tranzystory MOSFET T1 i T5 mają dodatkowo naniesione swoje oznaczenie - BS250. Rysunki diod są identyczne do stosowanych symboli na schemacie ideowym. Nie należy się nadmiernie sugerować złożonością układu, lecz spokojnie wlotować element po elemencie.

W ostatniej kolejności montujemy tranzystory połowe złączowe i mosfety. Po wstawieniu U1 w podstawkę włączyć zasilanie. **Podczas uruchamiania należy zachować ostrożność. Ważne są odpowiednie nawyki i dyscyplina: włączamy napięcie, sprawdzamy działanie regulatora (jedną ręką!), dokonujemy pomiarów i wyłączamy (wtyczką!) zasilanie.** Układ powinien leżeć na białej płaszczyźnie (np. kartce papieru) na przestronnym i uprzątniętym stole. Transformator separacyjny na niewiele się zda, ponieważ jego indukcyjność całkowicie dezorganizuje pracę regulatora, który z małymi dławikami radzi sobie jeszcze nie najgorzej (za dławikiem, najlepiej po jego obu stronach, trzeba dać kondensatory 100nF /630V). Indukcyjność dławika musi być minimalna, kilka zwojów na rdzeniu ferrytowym, bo charakter pracy regulatora na dużą nie pozwala. Z moich doświadczeń wynika, że w wielu przypadkach nie będą potrzebne żadne filtry (za małe moce).

Warto mieć odseparowany od sieci przyrząd pomiarowy (oscylloskop), więc transformator separujący jednak się przyda (z braku lepszego nawet TS200/8). Jest to wymóg absolutnie bezwzględny, jeśli obudowa oscyloskopu (i masa gniazd) przyjmuje przez wtyk zasilający potencjał zera sieci.

Na koniec kilka słów o podwójnym potencjometrze POT. Przy kręceniu plastikową gałką w prawo (maksymalna rezystancja) MOSFET T3 musi zostać całkowicie odcięty. W położeniu lewym przeciwnie. W miarę dodawania mocy rezystancja ścieżki oporowej winna maleć - i to w wolniejszym tempie niż na początku. Można użyć krajowego potencjometru typu B, jednak nie jest to najodpowiedniejsza droga do osiągnięcia satysfakcjonującego rezultatu. Polecam tylko te z zaskokami (ziarniste). Mają one np. 40 pozycji i możliwa jest kontrola oporności na każdej (początkowo różnice powinny przekraczać 20% by na ok. 10..15 zaskoków przed lewym skrajem wynosić 3 do 5%). Suwak potencjometru montażowego R7 wstępnie ustawiamy na połowie. Optymalne pole robocze na osi potencjometru POT rozciąga się między 5 zaskokiem (liczonym od prawego - na schemacie dolnego - położenia i zerowej jasności), a 25..35 położeniem (pełna moc).

Te 20..30 użytecznych etapów regulacji zupełnie wystarczy. Przedostatnie położenie suwaka potencjometru (poprzedzające maksimum jasności) będzie przypadać na 180..190V(rms).

Wiarygodny może być tylko pomiar oscyloskopem cyfrowym lub wysokiej klasy multimetrem z TRUE RMS na zakresie stałoprądowym. Na tanim sprzęcie wskazania będą zaniżone o kilkadziesiąt procent.

**UWAGA: nie wolno bezpośrednio włączać się końcówkami pomiarowymi na żarówkę! W pobliżu pełnej mocy występują na niej strome szpilki o amplitudzie 300V (co widać choćby na oscylogramie z rys. 2), które poprzez pojemności pasożytnicze wejściowego dzielnika (lub kondensatory kompensujące) mogą uszkodzić przyrząd. Pomiar można bez obaw przeprowadzić dopiero przez szeregowy rezystor 200..300k $\Omega$ , którego wartość, wobec Rwej multimetru (typowo 10..20M $\Omega$ ), nie wprowadzi znaczącego błędu.**

**Andrzej Kowalczyk, AVT**