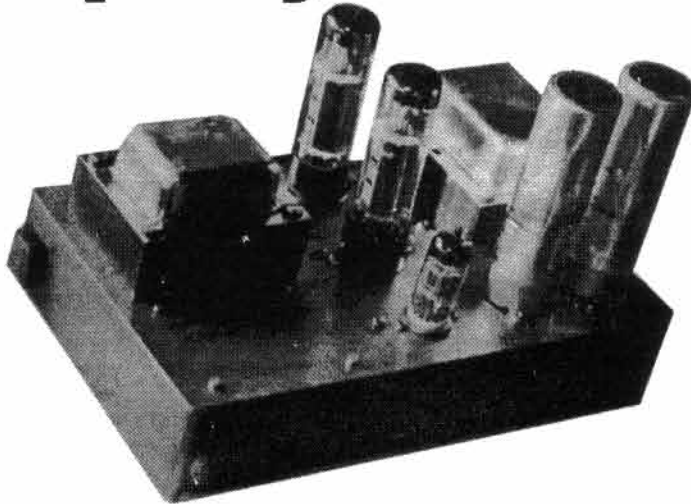


# Lampowy wzmacniacz Hi-Fi

## część 1



*Wykorzystując ogromne zainteresowanie wzmacniaczami lampowymi, przedstawiamy bardzo interesujący projekt, pozwalający konstruktorom-amatorom uzyskać własne „lampowe brzmienie“ bez konieczności płacenia wysokich cen sprzedawcom antyków elektronicznych. W pierwszej części artykułu przedstawimy podstawowe zagadnienia związane z konstrukcjami lampowymi, a w dwóch kolejnych - szczegółowy opis montażu i sposobu uruchomienia lampowej końcówki mocy.*

**UWAGA:** projekt ten nie jest przeznaczony dla początkujących. We wzmacniaczu obecne jest nie tylko napięcie sieciowe 220VAC, ale także wysokie napięcie stałe 450V, które jest bardziej niebezpieczne, ponieważ może spowodować skurcz mięśni. Należy zawsze używać sond z dobrą izolacją i zawsze upewniać się, że układ został wyłączony.

Należy podkreślić, że wskaźnik z diodą LED nie świeci, jeśli został przepalony bezpiecznik sieciowy, co oznacza że nie są rozładowywane kondensatory zasilacza, w związku z czym mogą nadal zawierać niebezpieczny dla życia ładunek elektryczny!

Biorąc pod uwagę kryterium „cena za jednostkę mocy“ wzmacniacze lampowe są od około 5 do 20 razy bardziej kosztowne niż wzmacniacze półprzewodnikowe. Powstaje więc pytanie: dlaczego używać lampy? Odpowiedź leży w rodzaju powstających zniekształceń - brzmienie wzmacniacza lampowego jest subiektywnie lepsze niż półprzewodnikowego, nawet jeśli obiektywnie zmierzony poziom zniekształceń wzmacniacza lampowego jest wyższy niż wzmacniacza tranzystorowego.

Zniekształcenia akustyczne stanowią skomplikowane zjawisko, a sposób ich odczuwania jest nieodłącznie związany z własnościami ludzkiego zmysłu słuchu. Ucho ludzkie powoduje zniekształcenia łagodnie rosnące ze wzrostem poziomu i ograniczone głównie do niskich harmonicznych. Nie jest więc zaskakujący wynik badań wskazujący, że zniekształcenia znacznie odbiegające od wprowadzanych przez ucho są wyraźniej odczuwane. Ludzie po prostu „wołają“ zniekształcenia, do których są przyzwyczajeni. Niestety, okazuje się że wzmacniacz klasy AB wykonany w technologii półprzewodnikowej generuje zniekształcenia o niemal dokładnie odwrotnych własnościach w porównaniu z własnościami zniekształceń powstających w ludzkim uchu - o wysokim poziomie dla niskich oraz bardzo wysokich poziomów sygnału (obcinanie). Często minimum zniekształceń występuje tuż przed zakresem obcinania, a powstające harmoniczne są wysokiego

nieparzystego rzędu, np. piątego lub siódmego, co powoduje brak czystości brzmienia przy wysokim oraz pogłos przy niskim poziomie.

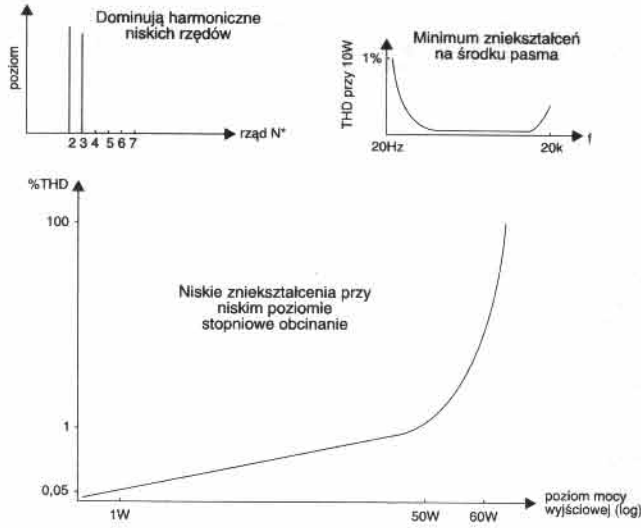
Krzywe zniekształceń w funkcji mocy wyjściowej obu technologii przedstawiają **rys. 1 i 2**.

Bardziej wnikliwi Czytelnicy zapewne zorientowali się, że zniekształcenia powodowane przez wzmacniacz tranzystorowy są bardzo zbliżone do powstających przy cyfrowej rejestracji dźwięku. Płyty kompaktowe wykazują większe zniekształcenia przy niskich poziomach, ponieważ informacja zakodowana jest wtedy przy pomocy niskiej liczby bitów. Można by wobec tego zrozumieć opinię, że niecelowe jest wykorzystanie wzmacniacza lampowego do współpracy z odtwarzaczem CD. Okazuje się jednak, że jest to jak najbardziej celowe - z niewiadomej przyczyny krzywa zniekształceń wzmacniacza lampowego maskuje zniekształcenia powodowane przez odtwarzacz, dzięki czemu jakość brzmienia ulega poprawie.

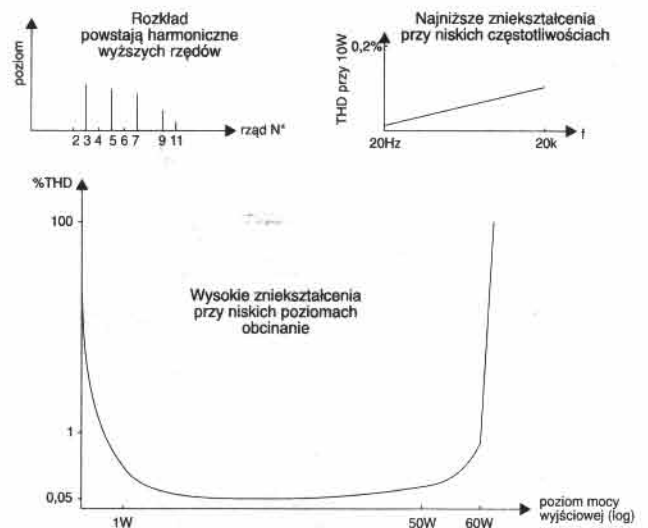
O jakości brzmienia decydują zniekształcenia wypadkowe (rząd harmonicznych oraz poziom) oraz odpowiedź częstotliwościowa całego systemu Hi-Fi. Efekt uzupełniania się komponentów systemu Hi-Fi nosi nazwę współdziałania i wykorzystywany jest od wielu lat w studiach nagraniowych, gdzie cyfrowa rejestracja i próbkowanie współistnieją z lampowymi wzmacniaczami gitarowymi i mikrofonowymi. Coraz większą popularność zdobywają odtwarzacze CD, w których za przetwornikiem C/A stosuje się wzmacniacz lampowy.

Odrębny czynnik wpływający na brzmienie wzmacniacza stanowi ujemne sprzężenie zwrotne, stosowane w celu ograniczenia zniekształceń i uzyskania płaskiej charakterystyki częstotliwościowej.

W układach z silnym sprzężeniem zwrotnym obcinanie jest bardziej gwałtowne. Jakkolwiek znie-



Rys. 1. Zniekształcenia wzmacniacza tranzystorowego klasy AB w funkcji mocy wyjściowej



Rys. 2. Zniekształcenia wzmacniacza lampowego w funkcji mocy wyjściowej

kształcenia harmoniczne zostają znacznie zredukowane, powstają harmoniczne wyższych rzędów. Łagodne obcinanie lub stopniowe przesterowywanie jest subiektywnie mniej nieprzyjemne i daje efekt zbliżony do mocniejszego uderzenia strun gitary lub klawiszy.

Istnieje orientacja w Hi-Fi utrzymująca, że wszelkie sprzężenie zwrotne jest niekorzystne. Całkowite odrzucenie sprzężenia jest praktycznie bardzo trudne do zrealizowania, ponieważ jedynymi elementami o charakterystykach dostatecznie liniowych by mogły pracować bez sprzężenia, są niektóre triody.

Ogólnie mówiąc, im gorszą liniowość wykazuje element wzmacniający, tym silniejsze musi być zastosowane sprzężenie zwrotne. Powstające przesunięcie fazowe i wymaganie zapewnienia marginesu stabilności ograniczają głębokość sprzężenia. Wzmacniacze lampowe zazwyczaj zawierają transformatory wyjściowe i kondensatory sprzęgające, ograniczające poziom sprzężenia do około 20dB (10-krotna redukcja wzmocnienia w otwartej pętli).

### Impedancja wyjściowa

Impedancja wyjściowa wzmacniaczy lampowych jest na ogół wyższa niż wzmacniaczy tranzystorowych, ze względu na słabsze sprzężenie, wyższą impedancję wyjściową samej lampy oraz rezystancje uzwojeń transformatora. Wysoka impedancja wyjściowa oznacza, że tłumienie wnoszone przez głośnik jest mniejsze i daje

wrażenie wyższej jakości basu. Dzięki temu niewielkie rozmiarami zestawy głośnikowe brzmią lepiej. Przykład stanowi LS3/5a konstrukcji BBC, używany często ze wzmacniaczami Quad.

Tabela 1 zawiera porównanie liniowości różnych elementów wyjściowych stopni mocy. Ciekawe jest to, że tranzystory MOSFET są najmniej liniowymi elementami - katalog firmy Hitachi stwierdza nawet, że stopień wyjściowy wykonany w technologii MOSFET daje 10-krotnie wyższe zniekształcenia niż porównywalny

stopień wykonany w technologii bipolarnej. Szczęśliwym zbiegiem okoliczności tranzystory MOSFET mają tak szerokie pasmo, że możliwe jest zastosowanie bardzo silnych sprzężeń zwrotnych linearyzujących charakterystykę i ograniczających zniekształcenia.

Kolejną przyczyną wyższej jakości dźwięku uzyskiwanego we wzmacniaczach lampowych nie jest sam fakt zastosowania lamp, ale to, że są to zazwyczaj wzmacniacze pracujące w klasie A. Pracują one z pełnym poborem mocy nawet bez wysterowania, a ele-

Tabela 1. Porównanie liniowości elementów stopni mocy

Element	Uwagi
Trioda	najlepsza liniowość, najniższe zniekształcenia, najniższa sprawność (2A3, 300B)
Tetroda wiązkowa (tryb ultraliniowy)	nieco wyższe zniekształcenia, sprawność zbliżona do pentody (6L6, KT66, EL34, 5881). Używana w 5-20 i układzie Williamsona.
Pentoda (tryb ultraliniowy)	używana w Leak Stereo 20. Zniekształcenia na poziomie pośrednim między triodą a tetrodą (EL84).
Pentoda	nadaje się do wzmacniaczy gitarowych. Dominuje 3-cia harmoniczna (np. Vox AC30 z EL84).
Tranzystor bipolarny	najtańszy. Trudny do wykorzystania w klasie A ze względu na straty mocy. Najwyższa sprawność (2N3055).
MOSFET	najbardziej niezawodny, najlepsza charakterystyka w zakresie wysokich częstotliwości, najgorsza liniowość (2SK135, 2SJ50).

menty stopnia wyjściowego przewodzą przez cały czas trwania cyklu. Oznacza to, że nie występują tu zniekształcenia skrośne.

Problem strat mocy w układach lampowych klasy A nie jest krytyczny. W przypadku wzmacniacza tranzystorowego klasy A niezbędny byłby bardzo duży radiator, w związku z czym jest to rozwiązanie rzadko spotykane.

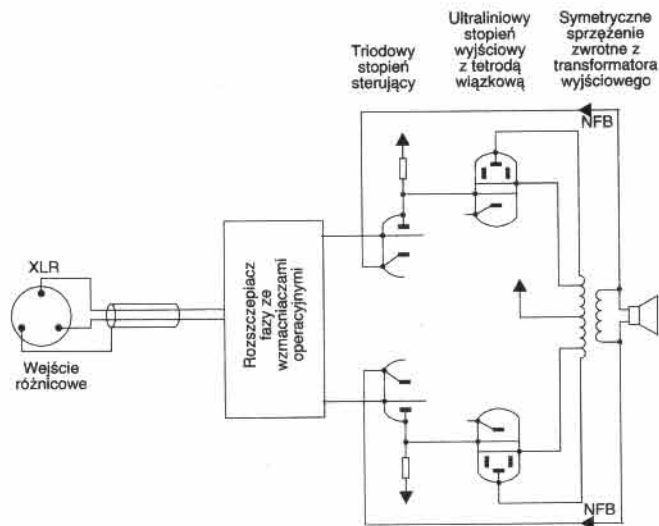
Schemat blokowy wzmacniacza lampowego zawiera odwracacz fazy zbudowany na wzmacniaczach operacyjnych, triodowy stopień sterujący oraz ultraliniowy stopień mocy z tetrodą EL34 (rys.3). Rozwiązanie stopnia mocy oparte jest na układzie Mullard 5-20.

Odwracacz fazy jest niezbędny w przeciwobnych układach lampowych, ponieważ nie istnieją lampy komplementarne. Wszystkie lampy są analogami tranzystorów npn, i dopóty, dopóki ktoś nie stworzy elektrody emitującej pozytrony (antymateria!), lampowy odpowiednik tranzystora pnp jest nieosiągalny.

Pojedyncze lampowe stopnie mocy nie wymagają odwracacza fazy i dają przyjemniejsze brzmienie, ponieważ nie jest eliminowana druga harmoniczna, co uwypukliłoby trzecią harmoniczną, jak to ma miejsce w układach przeciwobnych. Zasadniczą trudność w przypadku pojedynczych stopni stanowi wykonanie transformatora wyjściowego, przez który płynąłby stały prąd o dość dużym natężeniu.

W stopniu przeciwobnym prąd stały płynie w obu elementach w przeciwnych kierunkach, dzięki czemu powstające w rdzeniu strumienie pochodzące od tych prądów znoszą się. W przypadku pojedynczego stopnia niezbędna jest szczelina w rdzeniu, zapobiegająca jego nasyceniu, która niestety utrudnia uzyskanie wysokiej indukcyjności. Ostateczny wynik

Rys. 3. Schemat blokowy lampowego wzmacniacza Hi-Fi



jest taki, że cena transformatora do pojedynczego stopnia jest około 4-krotnie wyższa niż do stopnia przeciwobnego. Jeśli ograniczenia finansowe nie odgrywają roli, pojedynczy wzmacniacz triodowy zapewni najlepsze brzmienie, ale ultraliniowy wzmacniacz przeciwobny zapewni większość zalet układu lampowego przy minimalizacji kosztów.

Rozwiązanie ze wzmacniaczami operacyjnymi zostało wybrane ze względu na jego lepszą stabilność i brak dryftu obecnego w układach lampowych. Ponieważ układ pracuje z niskim poziomem sygnału i działa w klasie A, a zjawisko obcinania występuje w nim dla znacznie wyższych poziomów sygnału niż powodujące obcinanie w stopniu wyjściowym, w jego brzmieniu nie słychać żadnych skutków zastosowania technologii bipolarnej. Cenną zaletą jest także symetryczne wejście o niskiej impedancji, eliminujące przydźwięk sieciowy (lampowe stopnie wejściowe są zazwyczaj asymetryczne i mają dużą impedancję wejściową).

Ponieważ wzmacniacz ma

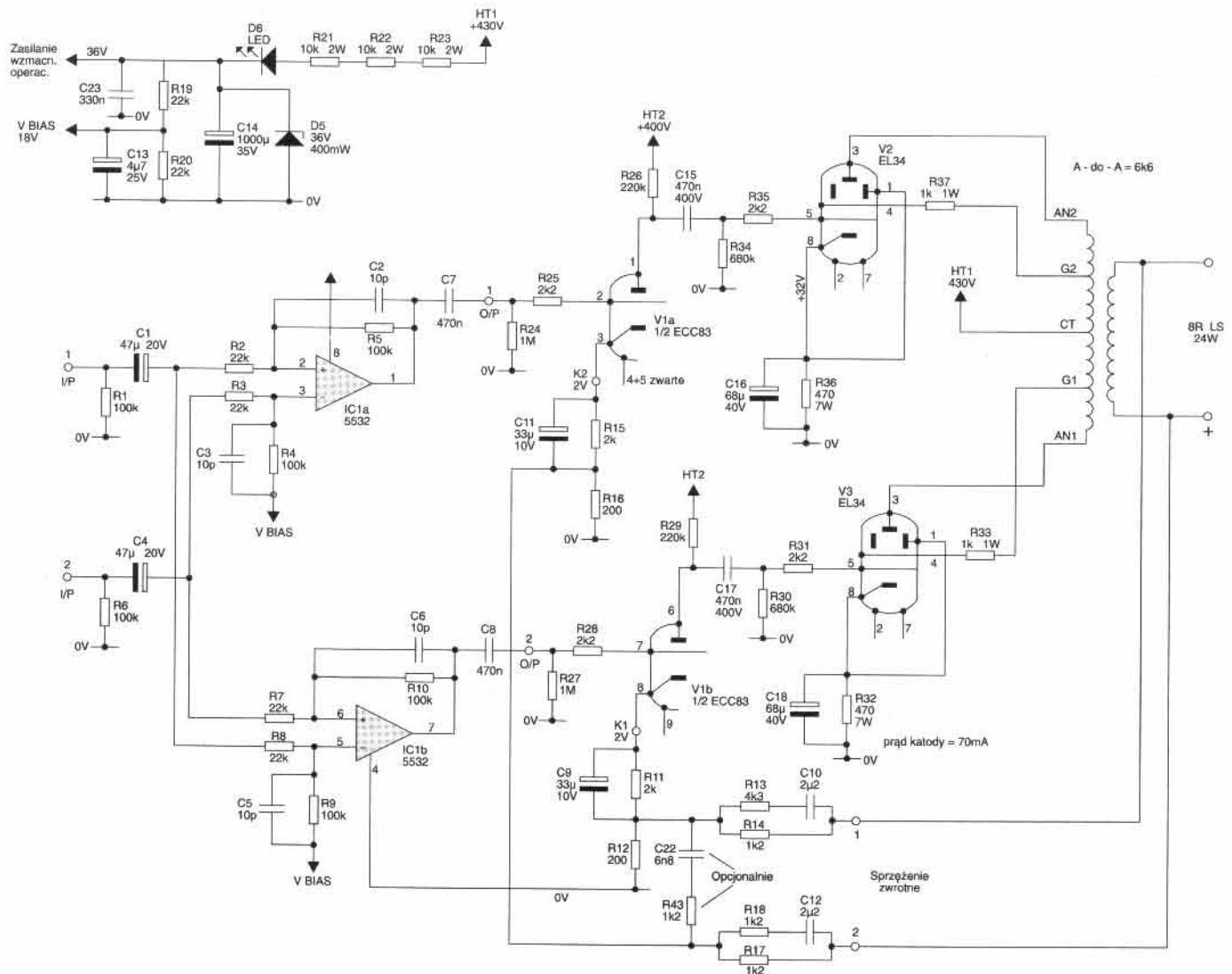
współpracować z odtwarzaczami CD, które zazwyczaj mają w filtrach wyjściowych wzmacniacze operacyjne pochodne układem Texas Instruments NE5532, z inżynierskiego punktu widzenia wydaje się, że można zastosować jeszcze jeden wzmacniacz NE5532 więcej. Przypadkowym zbiegiem okoliczności okazuje się, że 80% najlepiej sprzedawanych albumów zostało zmiksowanych na urządzeniach zawierających co najmniej 30 wzmacniaczy 5534 w torze sygnałowym!

Para wzmacniaczy różnicowych o wejściach sterowanych sygnałami w przeciwfazie tworzy układ odwracacza fazy. Konfiguracja ta została spopularyzowana przez Teda Fletchera z firmy Alice Mixers i zapewnia jednakową impedancję wejściową obu wejść. Pojedynczy wzmacniacz różnicowy ma różne impedancje wejść, co pogarsza współczynnik tłumienia sygnału wspólnego. Sygnały na wyjściu układu są w przeciwfazie, co sprawia, że układ ten doskonale nadaje się do zastosowania jako odwracacz fazy.

#### DANE TECHNICZNE WZMACNIACZA LAMPOWEGO

Moc wyjściowa .....	30W r.m.s./4Ω, 24W r.m.s./8Ω, 17W r.m.s./15Ω
Czułość wejściowa .....	300mV dla uzyskania pełnej mocy wyjściowej
Charakterystyka częstotliwościowa .....	20Hz - 20kHz, nierównomierność ±0.2dB
Zniekształcenia .....	poniżej 0.1% przy 15W, 8Ω w środkowej części pasma 0.25% dla 50Hz, głównie 2 i 3 harmoniczna
Pobór mocy .....	95W
Stosunek sygnał/szum (przydźwięk) .....	100dB





Rys. 4. Schemat ideowy odwracacza fazy i stopni mocy wzmacniacza

## Opis układu

Układ odwracacza (rys.4) ma wzmocnienie 4, co w zupełności wystarcza doysterowania stopnia lampowego, nie grożąc przy tym obcinaniem sygnału. Aby zapewnić maksimum zapasu napięcia zasilania, wynosi ono 33-36V. Pasma wzmacniaczy różnicowych jest ograniczone do 40kHz przez kondensatory C3 i C5, które blokują także częstotliwości radiowe.

Oba wzmacniacze są zasilane niesymetrycznie, połową napięcia zasilania (16.5V). Stwarza to konieczność zastosowania kondensatorów sprzęgających C1 i C4 na wejściu oraz C7 i C8 na wyjściu.

## Stopień sterujący

Trioda ECC83 wzmacnia sygnał wyjściowy wzmacniaczy operacyjnych do poziomu około 25V (RMS), zapewniającego pełneysterowanie stopnia wyjściowego.

Przy zasilaniu 400V, z rezystorami anodowymi R26 i R29 oraz katodowymi R15/R16 i R11/R12, stopień triodowy ma wzmocnienie około 50V/V, zbliżone do maksimum możliwości lampy.

Aby zapobiec wzbudzeniu się układu, siatki sterowane są przez rezystory blokujące R25 i R28. Siatki utrzymywane są na potencjale 0V dzięki rezystorom R24 i R27. Sygnał ujemnego sprzężenia zwrotnego doprowadzony jest symetrycznie do rezystorów katodowych R16 i R12 z wtórnej uzwojenia transformatora wyjściowego.

Rezystancja katodowa, zapewniająca polaryzację napięciem 2V, wynosi 2.2kΩ i złożona jest z pary rezystorów R15 i R16 oraz R11 i R12, przy czym R15 i R11, o rezystancji 2kΩ są z bocznikowane kondensatorami w celu uzyskania maksymalnego wzmocnienia w otwartej pętli.

Sygnał wyjściowy stopnia sterującego jest podawany na stopień końcowy przez kondensatory C15 i C17. Ponieważ na anodach ECC83 panuje napięcie 205V, należy bezwzględnie zastosować kondensatory o małej upływności i napięciu nominalnym 400V, np. polipropylenowe lub poliwęglanowe.

Lampy ECC83 zastosowano ze względu na ich wysokie wzmocnienie i dostępność. Bardziej śmiały konstruktorzy mogą zastosować lampy wyższej mocy jak 6SL7, lub nawet 12BH7, dzięki czemu uzyskają niższe zniekształcenia.

**Jake Rothman**

Artykuł publikujemy na podstawie umowy z redakcją miesięcznika "Everyday with Practical Electronics".