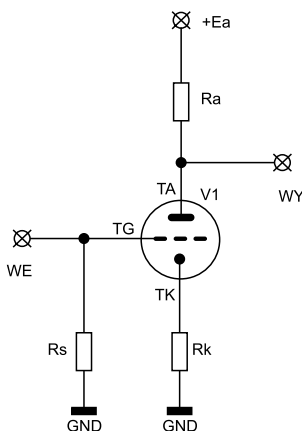


„Akrobatyka” układów lampowych

Każdy konstruujący samodzielnie wzmacniacze audio wie, że lampowe układy wzmacniające zwykle składają się z niewielu elementów i nie są skomplikowane w budowie. Te czynniki, obok naturalnej liniowości charakterystyk lamp, są często przytaczane jako argumenty przy próbach wytłumaczenia wyższości dźwięku „lampowego” nad „tranzystorowym”. Trzeba przyznać, że są one przekonujące z punktu widzenia tzw. zdrowego rozsądku, ale czy na pewno? W artykule opisano kilka typowych rozwiązań stosowanych we wzmacniaczach lampowych i omówiono ich parametry użytkowe.

Należy przyznać, że teza postawiona we wstępie potwierdza się w praktyce przy analizie schematów najlepszych konstrukcji wzmacniaczy audio na tyle często, że mało kto próbuje ją kwestionować. Główną dewizą konstruktorów techniki lampowej jest: im prościej, tym lepiej i bardziej niezawodnie. Niestety, mniejsza liczba elementów nie oznacza, że wzmacniacz lampowy jest tańszy od tranzystorowego, mimo że zgodnie z logiką należałoby tego oczekiwać.

Przeanalizujmy zwykły układ wzmacniacza lampowego z triodą pracującą w układzie ze wspólną katodą. Cała kaskada (pokazana na **rysunku 1**) jest zbudowana z: rezystora obciążenia anodowego, rezystora katodowego odpowiedzialnego za autopolaryzację, rezystora ustalającego wstępną polaryzację siatki sterującej i wreszcie samej lampy – triody. Reszta to elementy sprzęgające z innymi obwodami, bocznikujące składową zmienną (bocznikowanie rezystora katodowego kondensatorem), dzielnik w obwodzie katody dla realizacji bardziej złożonego układu polaryzacji, filtry odsprzę-



Rysunek 1. Trioda pracująca w układzie ze wspólną katodą

gające w obwodach zasilania lub elementy korygujące pasmo przenoszenia. Przeważnie obecność nawet wszystkich wymienionych dodatkowych elementów nie czyni układu wzmacniacza lampowego o wiele bardziej złożonym niż ten, który pokazano na rys. 1, a sposób działania jest zrozumiały już na pierwszy rzut oka.

Współczynnik wzmocnienia dla sygnałów o średnich częstotliwościach (przy braku miejscowego, ujemnego sprzężenia zwrotnego) wynosi:

$$K = - \frac{\mu \cdot Ra}{Ra + Ri}$$

Uwzględniając oporność wejściową następnego stopnia wzmacniacza R_{we2} , zamiast Ra podstawiamy $R_{o.ekw.} = R_{we2}$. Oporność wyjściowa układu $R_{wy} = Ri$, gdzie:

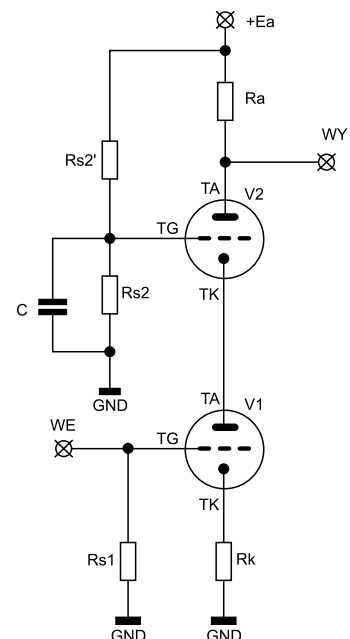
μ – współczynnik wzmocnienia lampy,
 S – nachylenie charakterystyki anodowo-siatkowej lampy,

Ri – oporność wewnętrzna lampy.

W układzie z triodą jak na rys. 1 współczynnik wzmocnienia typowo wynosi $(0,6-0,8)\mu$ i zależy od wielkości Ra . Podobnie inne parametry układu: prąd spoczynkowy, pasmo przenoszenia, szybkość narastania napięcia wyjściowego, liniowość, maksymalne napięcie wyjściowe o pewnym poziomie zniekształceń, maksymalny prąd wyjściowy. Przeważnie rezystancja Ra jest kilka razy większa od Ri i wówczas udaje się otrzymać optymalne wartości wymienionych wcześniej parametrów. Jednak możliwości układu z triodą są ograniczone, ponieważ dążenie do polepszenia jednego z parametrów odbywa się kosztem innych, niemniej ważnych. Dlatego stopień swobody w doborze rezystancji rezystorów obciążenia anodowego i autopolaryzacji katodowej jest dość ograniczony. To

samo można napisać odnośnie do napięcia zasilania anodowego i prądu spoczynkowego, ponieważ większość lamp najlepiej „brzmi” na granicy dopuszczalnej mocy rozpraszanej przez anodę. Zresztą, nawet w tych względnie wąskich, dopuszczalnych granicach dla konstruowanego układu wzmacniacza nie łatwo jest określić optymalny tryb pracy konkretnej lampy w danym układzie uwzględniając poprzednią i następną kaskadę. Pod pojęciem „optymalny” rozumiemy w danym wypadku taki tryb, który zabezpieczy najlepsze brzmienie, a nie rekordowe parametry czy piękne oscylogramy.

Można zaryzykować tezę, że rozbieżność pomiędzy doбором elementów kształtujących charakterystykę wzmacniacza i ich wpływem na uzyskiwane parametry jest główną przyczyną słabej korelacji między wartościami liczbowymi tych parametrów, a jakością dźwięku. Jeśli na przykład pragniemy uzyskać jak najlepszą liniowość układu, musimy zwiększać rezystancję anodową, co – zaczynając od pewnej wartości prądu anodowego – będzie wpływało negatywnie na szerokość pasma przenoszenia, właściwości dynamiczne układu wzmacniacza oraz na współczynnik wzmocnienia, który przy zbyt wysokiej rezystancji obciążenia zaczyna zmniejszać się, ponieważ zmniejsza się prąd spoczynkowy lampy i nachylenie charakte-



Rysunek 2. Zmodyfikowany układ pracy triody

rytyki S. Znacznie spada również zdolność przeciążeniowa układu. W ten sposób cena za dobrą liniowość okazuje się również nie-współmiernie wysoka, ponieważ musimy za nią „płacić” jakością dźwięku wzmacniacza. Dlatego, jeśli jedna kaskada na triodzie nie jest zdolna zapewnić żądanego wzmocnienia, należy włączyć kolejną lub kolejne. A w celu uzyskania dobrych właściwości dynamicznych, nieraz jesteśmy zmuszeni do zadolenia się skromnym współczynnikiem wzmocnienia zmniejszając rezystancję rezystora anodowego i zwiększając anodowy prąd spoczynkowy. Nawet w najprostszym układzie wzmacniającym może pojawić się dużo niuansów i zjawisk trudnych do wyjaśnienia, gdy sprawa dochodzi do „sądu ostatecznego” tj. do odsłuchu dźwięku za pomocą zbudowanego wzmacniacza.

Reasumując widzimy, że w triodowym układzie wzmacniającym różne jego parametry, z których każdy wykazuje odczuwalny wpływ na jakość brzmienia wzmacniacza, są we wzajemnej sprzeczności i nadmierna gorliwość w polepszaniu którejkolwiek z nich niezawodnie prowadzi do pogorszenia pozostałych. Istnieje jednak sposób, aby wyrwać się z tego zamkniętego kręgu.

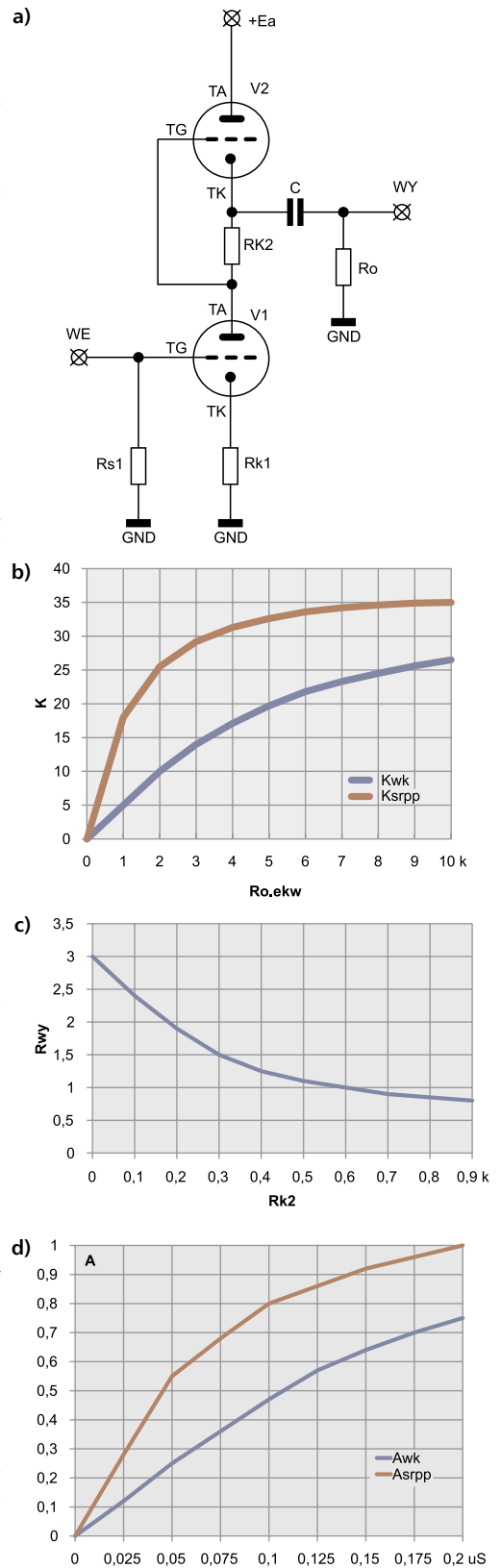
Do tego momentu opisywałem układ wzmacniacza z jedną triodą. A jeśli połączyć dwie triody w tym samym układzie? Przeczy to, rzecz jasna, koncepcji prostoty układu, lecz nieraz zamiast zwiększać liczbę najprostszych układów, można rozwiązać ten sam problem rozbudowując (w ograniczonej sposób) jeden układ. W zależności od problemu, który powinniśmy rozwiązać, możemy wybrać jeden z wariantów bardziej skomplikowanego układu na dwóch triodach. Należy zauważyć, że istnieje ich dość dużo i opracowane były już dawno. Na przykład kaskoda z rysunku 2 pozwala znacznie zwiększyć współczynnik wzmocnienia i jednocześnie poprawia szerokość pasma przenoszenia. Niektóre renomowane firmy produkujące sprzęt audio o najwyższej jakości nadal używają rozwiązań tego typu we wzmacniaczach (np. *Sonic Frontiers*).

Można sprzeczać się o celowość użycia układów kaskodowych w aparaturze audio i przeciwnicy takich układów twierdzą zwykle, że charakterystyki wyjściowe kaskod przegradzają się z triodowych w pentodowe. I mają rację. Ale i pentody nie zawsze są złe, a prawidłowo postawione pytanie powinno brzmieć nie „czego używać?”, lecz „jak i gdzie?”. Bez wątpliwości w większości wypadków triody są bardziej odpowiednie, ale w niektórych obwodach (najczęściej pomocniczych) pentody nie mają konkurencji. Na przykład, dzięki wysokim μ i R_i pentoda nie ma sobie równych w układach źródeł prądu stabilizowanego, jeśli nie brać pod uwagę tranzystorów polowych z izolowaną bramką. Ale to jest już zupełnie inna grupa podzespołów i mimo że pewne firmy, jak

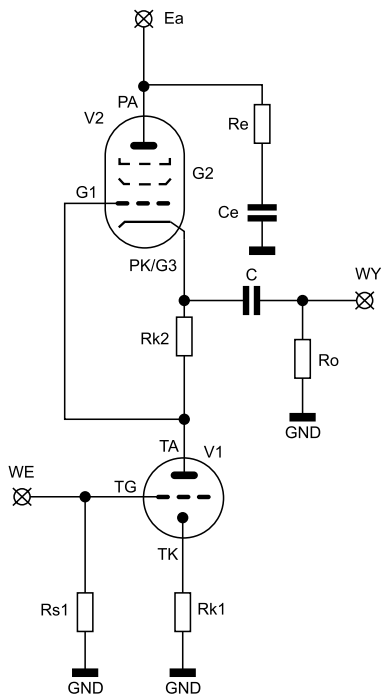
np. *Audio Research* osiągnęły powodzenie w opracowaniu i wdrożeniu technologii hybrydowych, osobiście nie mam wątpliwości, że jeśli zamiast tranzystorów MOSFET-ów używano by pentod, wiele z wyrobów tej firmy brzmiałoby bardziej miękko i naturalnie. A przypomnijmy profesjonalne magnetofony złotej ery magnetycznego zapisu dźwięku w latach 50. i 60. Wiele z nich w pierwszej kaskadzie wzmacniacza odtwarzania miało pentodę EF86.

Wróćmy jednak od próby udzielenia amnestii dożywotnio skazanym przez wielu audiofilów pentodom do znacznych triod. Kolejny układ pracy triody, który przeanalizujemy, przypomina kaskodę. W nim również użyto dwóch triod, z których jedna „wspięła się” na ramiona drugiej (rysunek 3). Tak, ten „cyrk lampowy” u wielu wywołuje sceptyczny uśmiech i na jego widok pojawia się lawina uszczypliwych komentarzy typu „Człowieku! Przepraszam, ale trioda powinna chodzić po ziemi!” tzn. być dołączona katodą do masy. Ale tak czy inaczej, ten układ zasługuje na uwagę, ponieważ dzięki niemu uzyskuje się polepszenie kilku ważnych parametrów: stabilności pracy, liniowości charakterystyki przejściowej, oporności wyjściowej, szerokości pasma, zdolności obciążeniowej i odporności na zaburzenia oraz pulsacje napięcia zasilania anodowego. Co do dźwięku, to wszyscy wiedzą, że wzmacniacze produkowane przez firmy *Audio Note* i *Cary Audio Designs* wcale nie brzmią źle! Właśnie te firmy częściej niż inne używają jako układów wyjściowych lub sterujących układów pokazanych na rysunku 3a. Najczęściej jest on nazywany SRPP (*Shunt Regulated Push Pull*). Ta nazwa może wprowadzać w błąd, ponieważ *push pull* służy jedynie do określenia przeciwfazowości sygnałów górnej i dolnej triody. W ten sam sposób z powodzeniem *push pull*em można byłoby nazwać klasyczny układ z dwóch triod połączonych jedna za drugą – tam także sygnały są w przeciwnych fazach. Z tego powodu SRPP to niepoprawna nazwa, jednak jest zakorzeniona w literaturze. Można spotkać też skrót TTSA (*Two Tubes Series Amplifier* – dwulampowy wzmacniacz szeregowy), chociaż może ona prędzej służyć jako wspólne określenie dla wszystkich układów w konfiguracji pionowej, w tym i kaskod. My ten układ nazywamy prosto i przejrzysto: wzmacniacz z obciążeniem dynamicznym.

We wzmacniaczu z obciążeniem dynamicznym zamiast zwyczajnego rezystora obciążenia anodowego układ SRPP ma w obwodzie anody drugą triodę, punkt pracy której wyznacza się rezystorem R_{k2} . Przy nadejściu dodatkowej części sygnału na siatkę $V1$ prąd dolnej triody zwiększa się, co prowadzi do zwiększenia się spadku napięcia na rezystorze R_{k2} , a to z kolei prowadzi do zmniejszenia prądu górnej triody $V2$. W układzie występuje tendencja do stabilizacji prądu anodowego,

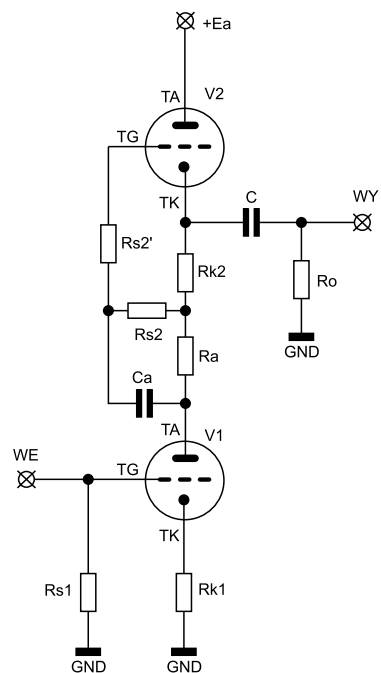


Rysunek 3. a) Trioda pracująca w układzie SRPP (*Shunt Regulated Push Pull*), b) Zależność współczynnika wzmocnienia układu SRPP z podwójną triodą 6N3P ($\mu=38$, $R_i=5,8$ kΩ) od ekwiwalentnej oporności obciążenia $R_{o,ekw}$, c) Zależność oporności wyjściowej układu SRPP od rezystancji R_{k2} , d) Porównanie charakterystyk dynamicznych układów z rys. 2 i rys. 3a wykonanych w oparciu o lampę 6N3P przy pojemności obciążenia $C_o=30$ pF



Rysunek 4. Zastosowanie pentody zamiast triody w układzie z rys. 3a

który zależy teraz od zmiany sygnału wejściowego w mniejszym stopniu, niż w zwykłym układzie na rezystorach. Kombinowane obciążenie (trioda V2 i rezystor Rk2) swoimi właściwościami zaczyna zbliżać się do źródła prądu. Cóż w tym dobrego? Wiadomo, że źródło prądowe ma dużą oporność wewnętrzną, która w idealnym źródle prądowym jest nieskończenie wielka. A teraz przypomnijmy sobie, że układ triodowy jest tym bardziej liniowy, im większy jest rezystancja jego rezystora anodowego. Jak napisano wcześniej, zwiększanie jego rezystancji prowadzi jednak do pogorszenia innych parametrów wzmacniacza. Pozostaje nam tylko „związać” triodę



Rysunek 5. Zmodyfikowany układ SRPP

V1, przy tym jej obciążenie rozdwa się: dla prądu stałego jest ono niewielkie i równe $Rk2 + Ri2$, co zabezpiecza normalne warunki pracy bez zwiększania napięcia anodowego, a dla prądu zmiennego jest dużo większe (dynamiczna oporność obciążenia) i określa się wielkością $Rk2$ i parametrami górnej triody:

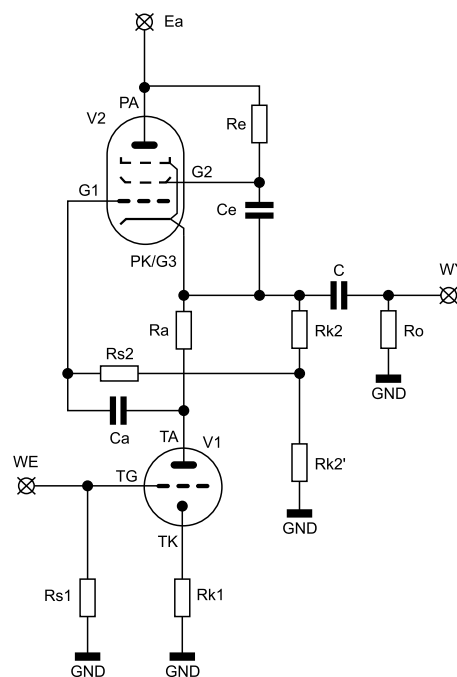
$$R_{dyn} = Rk2 \cdot (1 + \mu) + Ri$$

Daje to możliwość uzyskania nieco większego współczynnika wzmocnienia układu SRPP w porównaniu ze zwykłym. A ponieważ sygnał wyjściowy jest zdejmowany z katody V2, to i oporność wyjściowa jest znacznie niższa. Rzeczywiście, gdy taki układ pracuje z obciążeniem o małej rezystancji możemy uzyskać korzystny współczynnik wzmocnienia i szerokie pasmo przenoszenia. Można w nim również uzyskać dobre parametry dynamiczne pod warunkiem przepływu wystarczającego prądu spoczynkowego lampy. Należy przy tym brać pod uwagę nie tylko szybkość odpowiedzi układu wzmacniacza, ale i wartość sygnału oddawanego do obciążenia. Z tych powodów układ SRPP znalazł zastosowanie we wzmacniaczach wizji, w których należy zapewnić maksymalną wielkość iloczynu $K\Delta f$ oraz w innych układach o dużej szybkości, z pewnością na długo przed tym, nim komuś przyszła myśl, aby wypróbować go we wzmacniaczach audio. Jego zalety są szczególnie widoczne podczas pracy w układach, w których pojemność obciążenia jest dość duża. Do takiej kategorii należą sterowniki, które pracują zasilając siatki kilku lamp wyjściowych połączonych równolegle lub pojedynczą lampę o dużej pojemności wejściowej. Na rysunku 3b zaprezentowano zależność współczynnika wzmocnienia układu SRPP (K_{srpp}) wykonanego w oparciu o podwójną triodę 6N3P ($\mu=38$, $Ri=5,8\text{ k}\Omega$) od ekwiwalentnej oporności obciążenia Ro . ekw., przy $Rk2=820\ \Omega$. Krzywa K_{wk} odpowiada typowemu układowi ze wspólną katodą. Na rysunku 3c pokazano zależność rezystancji wyjściowej układu SRPP od rezystancji $Rk2$. Na rysunku 3d zamieszczono charakterystyki dynamiczne obu układów wykonanych w oparciu o lampę 6N3P i przy pojemności obciążenia $Co=30\text{ pF}$.

Jednak mimo swoich zalet, układ SRPP nie jest idealny. Mimo że kombinowane obciążenie anodowe ma pewne własności źródła prądowego, z powodu małego μ (co jest cechą triod) lampa V2 nie na tyle dużego wzmocnienia, aby całkowicie zniwelować spadek napięcia na $Rk2$ powodowany zmianą prądu sygnału. Można ten problem rozwiązać dwoma sposobami: przez zastosowanie jako V2 nie triody lecz pentody lub zwiększyć poziom sygnału na siatce V2. Pierwszy sposób prowadzi do rozwiązania układowego, które pokazano na rysunku 4, a drugi do tzw. wzmocnionego SRPP, który jest niestety nieco bardziej skomplikowany (rysunek 5). Rzecz w tym, że nie

można znacznie zwiększyć poziom sygnału na siatce V2 po prostu zwiększając rezystancję $Rk2$, ponieważ od jej wartości zależy położenie punktu pracy układu i nadmierne zwiększanie rezystancji $Rk2$ może zniwelować wszystkie zalety układu SRPP (w pierwszej kolejności pogorszy się rezystancja wyjściowa). Można postąpić inaczej – zabezpieczyć potrzebną polaryzację za pomocą dzielnika rezystorowego $Rk2/Ra$ zastępując nim rezystor $Rk2$, co da nam więcej swobody przy wyborze poziomu sygnału na siatce V2, który jest proporcjonalny do wielkości dolnego rezystora dzielnika. Sygnał podaje się na siatkę przez kondensator Ca . Współczynnik wzmocnienia takiego układu jest już dość bliski do μ dolnej triody. Nie wolno zapominać, że właśnie od niej w dużej mierze zależy funkcjonowanie układu, a cała reszta służy do stworzenia jej jak najlepszych warunków pracy. Dlatego układ wzmocnionego SRPP jest nazywany *Mu Follower* – wtórnik μ . I znów ta efektowna nazwa jest nieco na wyrost, ponieważ mimo że współczynnik wzmocnienia SPRR znacznie zbliża się do wartości μ dolnej triody, to nie jest mu równy. Jeśli jednak zamienić górną triodę na pentodę i nieco zmodyfikować schemat, można jeszcze zbliżyć współczynnik wzmocnienia układu do μ dolnej lampy jednocześnie zmniejszając rezystancję wyjściową układu i rozszerzając jego zakres dynamiczny. Schemat z rysunku 6 był opublikowany na łamach *Glass Audio* w 1993 r. i jest nazwany jest μ -układem (Allan Kimmel. „The Mu Stage”, *Glass Audio* 2/1993).

Konstrukcja układu umożliwia prawie dowolną nastawę prądów spoczynkowych dolnej i górnej lampy. Prądy mogą być różne, ponieważ polaryzacja pentody jest ustalona za pomocą osobnego dzielnika rezystorowego



Rysunek 6. μ -układ opublikowany przez Allana Kimmela na łamach *Glass Audio* 2/1993

Rk2/Rk2', który przyczynia się do dalszego obniżenia rezystancji wyjściowej. Wielkością obciążenia anodowego Ra triody również można w pewnych granicach manipulować. Pentodę można uważać za wtórnik katodowy ze współczynnikiem przenoszenia (wzmocnienia) bardzo bliskim jedności. W ten sposób, jakakolwiek zmiana napięcia na anodzie czyli na dolnym wyprowadzeniu rezystora Ra, z dużą dokładnością jest powtarzana przez wtórnik katodowy z pentodą V2 i pojawia się na górnym wyprowadzeniu Ra. Wymusza to stały spadek napięcia na Ra i jego niezależność od sygnału. I to właśnie jest źródło prądowe, oczywiście nieidealne, ale zbliżone do idealnego. Osoby „uczulone” na pentody, mogą zastosować triodę jako lampę V2, ale wówczas otrzymają układ o słabszych parametrach. Wtórnik katodowy z triodą zazwyczaj ma współczynnik przenoszenia K rzędu 0,9. Pentoda może z łatwością zapewnić współczynnik $K=0,995$, a nawet wyższy.

Przyjmijmy wielkość $R_a=6,8\text{ k}\Omega$ i wyznaczmy rezystancję dynamiczną dla układów na triodzie i pentodzie odpowiednio z wyrażenia $R_{dyn.}=R_a/1-K$. Otrzymamy $R_{dyn. triod.}=68\text{ k}\Omega$; $R_{dyn. pent.}=1,36\text{ M}\Omega$. Różnica jest aż 20-krotna!

Wtórnik katodowy, notabene, również nie mają nieskazitelnej reputacji wśród audiofilów z wykształceniem technicznym. Lecz mimo tego – jak twierdzi Allan Kimmel – w takim układzie wtórnik katodowy z pentodą to strzał w dziesiątkę. I ogólnie, pentody w układach wtórników katodowych mają o wiele lepsze parametry (mniejsza oporność

wyjściowa i tłumienie) i zapewniają lepsze brzmienie. Allan Kimmel pisze, że długo eksperymentował ze wszystkimi opisanymi układami lampowymi we wszelkich możliwych wariantach i wszystkie one, pod warunkiem profesjonalnego wykonania, brzmią bardzo dobrze, a najlepiej z nich – właśnie μ -układ. Szczególnie nadaje się on do sterowania triod mocy o niskich współczynnikach wzmocnienia (μ), które wymagają dużej amplitudy sygnału kierującego. Otrzymałem przez Kimmela parametry jego μ -układu (rysunek 7):

- rezystancja wyjściowa $100\ \Omega$,
- amplituda sygnału wyjściowego 215 V_{pp} przy współczynniku zawartości harmonicznych $0,7\%$ i napięciu anodowym 300 V ,
- pasmo przenoszenia (-3 dB) $0,3\text{ Hz} \dots 1\text{ MHz}$.

Jako triodę użyto popularnej lampy 6DJ8 (odpowiednik rosyjski 6N23P). Jej połówki są połączone równolegle, co ma pozytywny wpływ na rezystancję wyjściową. Pentodą jest lampa 12GN7 (zamiennik nieznan, jednak w jej miejscu można użyć każdej pentody z dostatecznie wysokim μ , mogącej pracować przy wymaganym prądzie spoczynkowym, który nietrudno jest wyznaczyć z not katalogowych lampy 6N23P; z pewnością nie zawiedzie pentoda 6Ż9P).

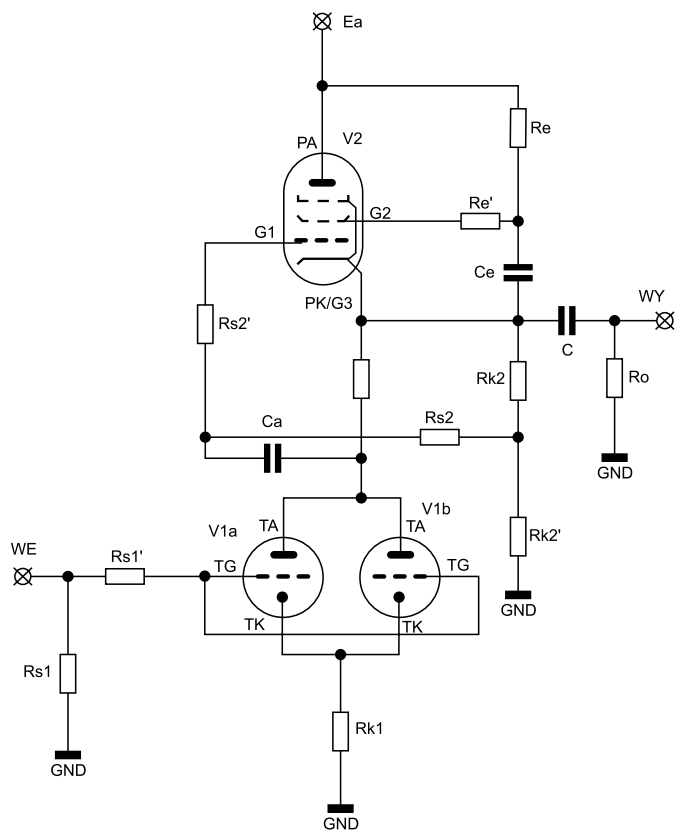
W Glass Audio nr 5/1996 Allan Kimmel opublikował artykuł pt. „A Direct Coupled Mu Stage”, w którym opisał jeszcze doskonalszy układ. Jego schemat ideowy pokazano na rysunku 8. Trudno powiedzieć czy idea stworzenia tego układu należy do niego, czy zapo-

życzył ją ze starej literatury (przecież często bywa, że wiele nowości okazuje się starszymi od swoich „wynalazców”). Tak czy inaczej, idea jest oryginalna: usunięto kondensator Ca, więc anoda triody i siatka sterująca pentody są połączone bezpośrednio. Jednocześnie wprowadzono „pływające” źródło zasilania siatki ekranującej, co pozwoliło zlikwidować kondensator Ce, chociaż jego wpływ na pracę układu nie był znaczący. Tym niemniej, poprawiono parametry poprzedniego układu (z rys. 7): oporność wyjściowa zmalała do $80\ \Omega$, maksymalne napięcie wyjściowe wynosiło 269 V_{pp} przy współczynniku zawartości harmonicznych $0,9\%$ i napięciu zasilania anodowego 300 V . Spadła przy tym dolna częstotliwość graniczna do wartości $0,15\text{ Hz}$ (poprzednio $0,3\text{ Hz}$).

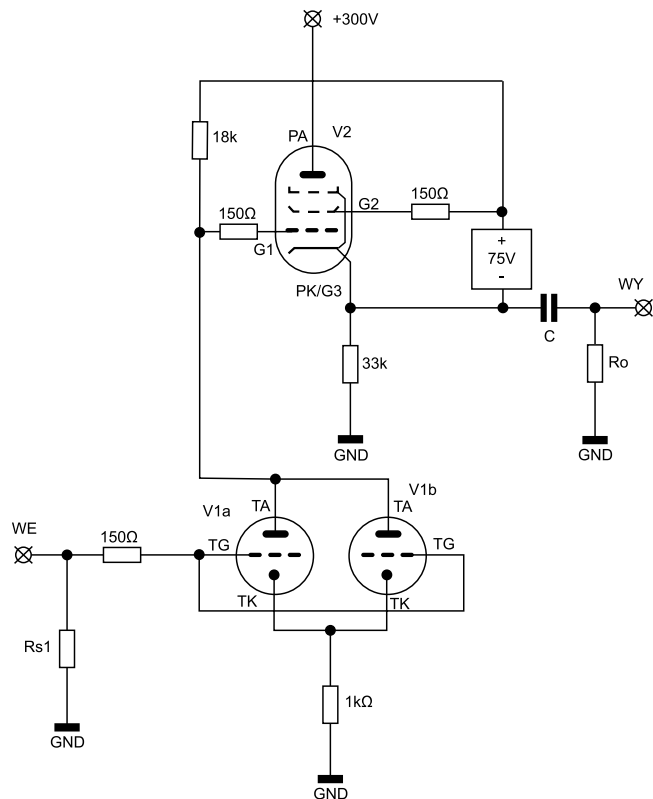
Podsumowanie

Dokonałszy przeglądu kilku układów lampowych, z których każdy charakteryzuje się konfiguracją pionową. Istnieją inne układy o pionowej konfiguracji i (jak często bywa) każdy następny ma lepsze parametry niż poprzedni, ale jednocześnie staje się bardziej złożony. Dlatego, jeśli mogę, chciałbym poradzić tym Czytelnikom, którzy zdecydują się wypróbować posługując się własnym słuchem któryś z układów opisywanych w artykule, aby nie byli maksymalistami i nie konstruowali najbardziej złożonych układów. Któż to wie: a może któryś z układów pośrednich da najlepsze rezultaty?

Jerzy Grnaderjan
jurekl4@gazeta.pl



Rysunek 7. μ -układ Allana Kimmela z podwójną triodą



Rysunek 8. Zmodyfikowany μ -układ Allana Kimmela opublikowany w Glass Audio 5/1996