

# Lampy 6SN7 i ECC99 w stopniu sterującym wzmacniacza

Wśród wielu lamp stosowanych w aplikacjach stopni sterujących wzmacniaczy akustycznych wyróżnić można dwie popularne grupy. Pierwsza to znane od lat, mające wielu fanów ich „czarującego dźwięku” wysokonapięciowe 6SN7 różnych producentów, w tym z rosyjskim odpowiednikiem 6N8S (6H8C), a grupa druga to podobne do siebie niskonapięciowe – rosyjska 6N6P i słowacka ECC99. Lampa słowacka różni się od rosyjskiej wysokim dopuszczalnym napięciem pracy  $U_{k/h}$  (katoda-żarzenie) wynoszącym aż  $\pm 200$  V, co predysponuje ją do zastosowań w stopniach kaskadowych. W opracowaniu opisano możliwości praktycznego wykorzystania tej cechy.

Znana jest opinia, że lampy najlepiej pracują z mocą bliską mocy maksymalnej, jednak takie ustawienie parametrów skraca ich żywotność. Informacje o związku tych zależności nie są na ogół podawane w kartach katalogowych lamp. Pewnemu zorientowaniu się

mogą posłużyć dane rosyjskiej lampy mocy 6S33S (6C33C), notabene stabilizacyjnej, gdzie dla mocy maksymalnej  $P_{maks.} = 60$  W żywotność jest oceniana na ok. 750 godzin, natomiast przy jej ograniczeniu do 45 W żywotność wzrasta do 3000 godzin, a więc około 4-krotnie. W opisach omawianych przykładów wprowadzono współczynnik wykorzystania mocy „ $n_p$ ”, który wyraża proporcję mocy pracy lampy w aplikacji do jej mocy maksymalnej dopuszczalnej przez producenta. Przyjęto też, że mając na uwadze otrzymanie sygnału o możliwie jak najlepszym brzmieniu, współczynnik wykorzystania mocy  $n_p$  powinien zawierać się w zakresie 0,6...0,75.

W tabeli 1 wyszczególniono wybrane parametry opisywanych lamp.

## Podstawowy układ pracy „wspólna katoda”

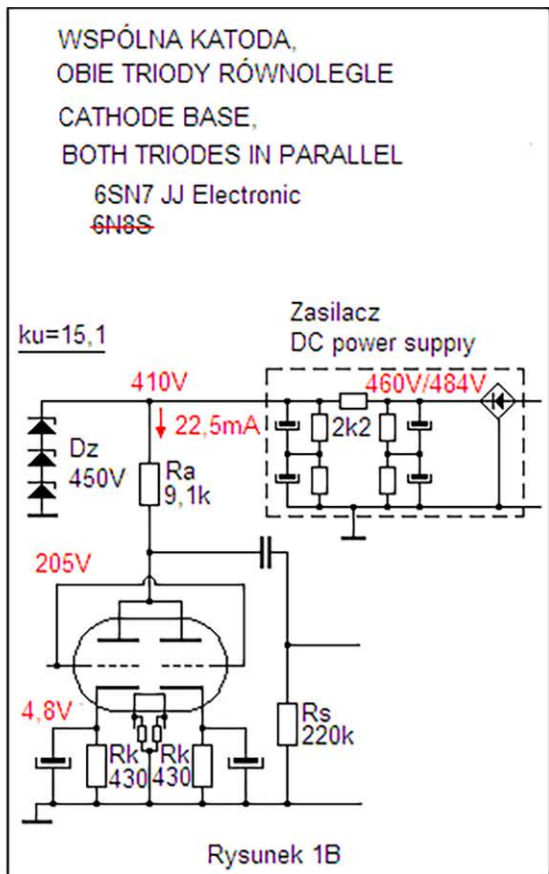
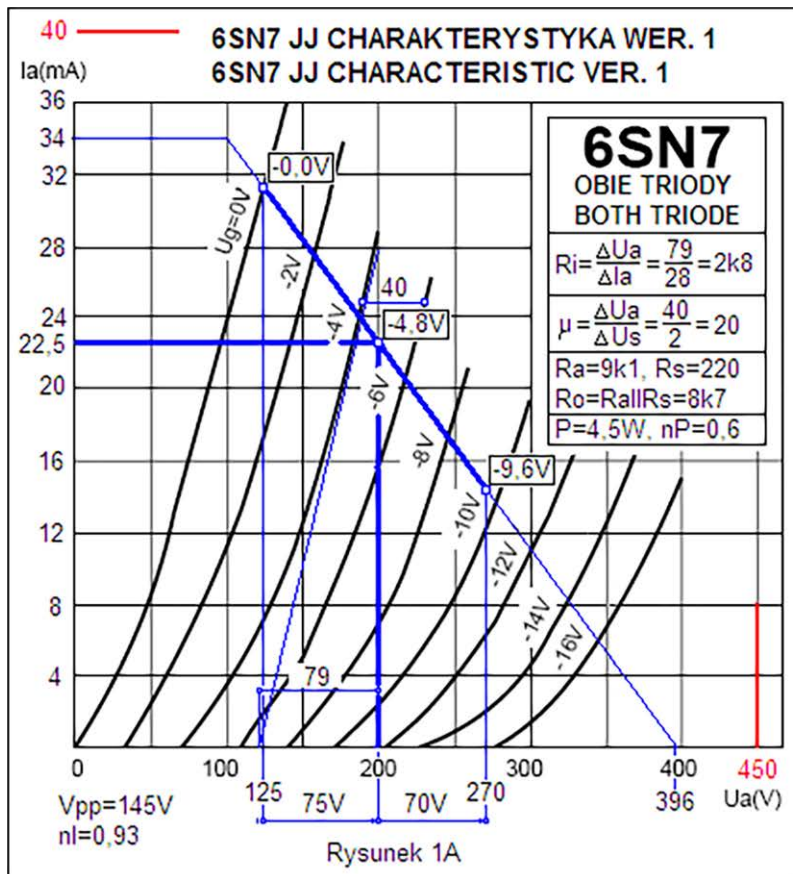
### LAMPY 6SN7 I 6N8S

Parametry spoczynkowego punktu pracy dla typowej charakterystyki są następujące:  $U_a = 250$  V,  $I_a = 9$  mA,  $U_s = -8$  V. Nie jest to szczęśliwy wybór, ponieważ przy dopuszczalnym napięciu pracy 330 V dla lampy 6N8S i braku informacji o dopuszczalnym napięciu dla lampy nieobciążonej, a sytuacja taka ma miejsce przy włączeniu zasilania, zanim

Tabela 1. Parametry techniczne lamp opisywanych w artykule

Typ lampy	Typical characteristics						Maximum ratings				
	$U_a$ V	$U_g$ V	$I_a$ mA	$R_i$ k $\Omega$	$\mu$	$P^{1)}$ W	$P^{2)}$ W	$U_a$ V	$U_a^{3)}$ V	$I_k$ mA	$U_{k/h}$ V
ECC99	150	-4	18	2,3	22	5	3,5	400		60	$\pm 200$
6H6P	120	-2	28	1,8	22	4,8/	4	300	450	40	100
6SN7	250	-8	9	7,7	20	5	3,75	450	?	20	$\pm 100$
6H8C	250	-8	9		21,5		2,75	330	?	20	100

$P^{1)}$  – dla każdej triody,  $P^{2)}$  – dla równoległego połączenia triod,  $U_a^{3)}$  – napięcie lampy nieobciążonej



Rysunek 1. Charakterystyka (A) i układ pracy (B) lampy 6SN7

lampa się rozgrzeje i parametry pracy się ustabilizują, należy przyjąć, że jest to również napięcie dla lampy nieobciążonej. W bilansie trzeba też uwzględnić spadek napięcia na filtry tętnień zasilacza anodowego około 50 V, gdy spadek napięcia na rezystorze anodowym  $R_a$  mógłby wynieść nie więcej niż  $330\text{ V} - 250\text{ V} - 50\text{ V} = 30\text{ V}$ , a wtedy jego wartość mogłaby wynieść co najwyżej  $R = 30\text{ V} / 9\text{ mA} = 3,33\text{ k}\Omega$ , więc taka aplikacja traci sens. Nieco lepiej wypada tutaj lampa 6SN7 JJ, w której przy napięciu dopuszczalnym 450 V spadek napięcia na rezystorze  $R_a$  może wynieść 150 V, a jego wartość wyniesie wtedy 16,7 k $\Omega$ . Jednak i w tym wypadku należy się liczyć z dużymi zniekształceniami linowymi. Zmiana punktu pracy lampy z  $U_a = 250\text{ V}$ ,  $I_a = 9\text{ mA}$ ,  $U_s = -8\text{ V}$  przy zachowaniu tej samej mocy 2,25 W na spoczynkowy punkt pracy:  $U_a = 200\text{ V}$ ,  $I_a = 11,25\text{ mA}$ ,  $U_s = -4,8\text{ V}$  polepszy warunki pracy lampy. Na rysunkach 1a i 1b pokazano charakterystykę i aplikację dla nowego punktu pracy z tym, że z uwagi na dużą oporność wewnętrzną  $R_i$  w celu jej zmniejszenia, obie triody lampy połączono równolegle. W nowych warunkach pracy zmieni się też oporność wewnętrzna  $R_i$ , która będzie teraz mniejsza oraz nieco wzrośnie współczynnik amplifikacji  $\mu$ , chociaż z wykresu to nie wynika, ale jest oczywiste, bo po przesunięciu punktu pracy z 250 V na 200 V wchodzimy w obszar, gdzie jednostkowym przyrostom napięcia siatkowego odpowiadają większe przyrosty napięć anodowych.

Współczynnik wzmocnienia „ku” można wyznaczyć z wykresu, dzieląc wartość amplitudy napięcia międzyszczytowego  $V_{pp} = 145\text{ V}$  przez wartość bezwzględną amplitudy napięcia siatkowego  $-9,6\text{ V}$ , czyli  $k_u = 145 / 9,6 = 15,1$ , ale można też obliczyć analitycznie ze wzoru:

$$k_u = - \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_o}}$$

$$R_o = \frac{R_a \cdot R_s}{R_a + R_s}$$

Dla omawianego wypadku

$$k_u = - \frac{20}{1 + \frac{2,8}{8,7}} = -15,2$$

$$R_o = \frac{9,1 \cdot 220}{9,1 + 220} = 8,7\text{ k}\Omega$$

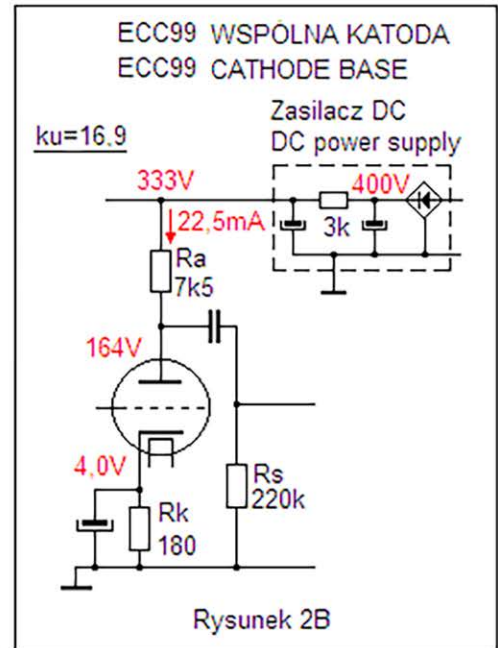
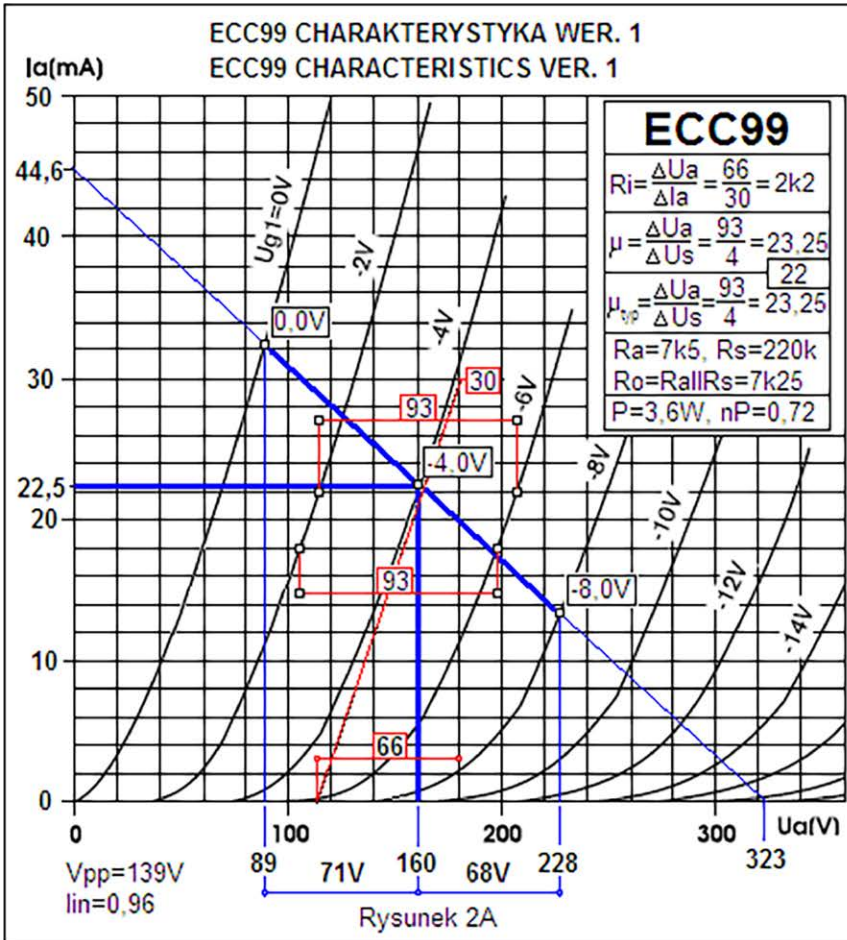
Lampa, jak pokazano na rysunku 1B, wymaga wysokiego napięcia zasilającego, co pociąga za sobą konieczność zaprojektowania

rozbudowanego zasilacza i zabezpieczenia lampy przed wystąpieniem na jej elektrodach napięcia przewyższającego dopuszczalne 450 V. Napięcie doprowadzone na wejście zasilacza 460 V jest napięciem pracy pod obciążeniem, a 484 V to napięcie bez obciążenia. Obliczono je na przykładzie transformatora rzeczywistego na robocze napięcie niższe, bo 400 V DC, a w wyniku przeliczenia przekładni zwojowej otrzymano napięcie biegu jałowego 420 V, czyli wyższe o 5,1%. Należy mieć też na uwadze, że napięcie mogące się występować na wejściu zasilacza może przewyższać podane 484 V DC z powodu wahań napięcia zasilającego sieci elektroenergetycznej, które może być wyższe od nominalnego 230 V, jeżeli mieszkamy blisko stacji transformatorowej, jak też w okresie pozaszczytowym, na przykład w porze nocnej. Przy zbiegu tych okoliczności napięcie DC może przekroczyć 500 V! Kondensatory elektrolityczne na napięcie robocze 500 V są co prawda oferowane w katalogach producentów, natomiast w handlu dostępne są przeważnie te o napięciu nieprzekraczającym 450 V.

Istnieje kilka sposobów na obniżenie napięcia zasilającego bez pogarszania walorów dźwiękowych lampy, tj. przy utrzymaniu mocy pracy na poziomie co najmniej 4,5 W.

Większość lamp końcowych wymaga do pełnego wysterowania napięcia międzyszczytowego  $V_{pp}$  o wartości około 120 V. Na przykład lampa 300B lub tak zwany „diabełek” 6S33S, chociaż w wypadku tej lampy zazwyczaj jest wykorzystywane napięcie sterujące z zakresu 70...72 V ( $V_{pp} = 140...144\text{ V}$ ) przy transformatorze głośnikowym 600  $\Omega$ , ale nic nie stoi na przeszkodzie, aby bez zmniejszania mocy zaprojektować stopień końcowy dla napięcia siatkowego  $U_s = -60\text{ V}$ , zwiększając prąd  $I_a$  i odpowiednio zmniejszając napięcie  $U_a$ . Możliwości te zostały opisane w grudniowym wydaniu „Elektroniki Praktycznej” w artykule „Stopień mocy wzmacniacza lampowego SE 6C33C”.

Zmniejszając napięcie  $U_a$  o około 7...8 V, czyli z 200 V do wartości około 192...193 V i zwiększając prąd  $I_a$  do wartości 23,3...23,4 mA, utrzymamy ten sam poziom oddawanej mocy, to jest 4,5 W, a po dobraniu nowego rezystora anodowego  $R_a$  spadek napięcia zmniejszy się też o 7...8 V, czyli łącznie obniżymy napięcie o około 15 V.



Rysunek 2. Charakterystyka (A) i układ pracy (B) lampy ECC99

Jeżeli zastosujemy rozwiązanie opóźniające włączenie napięcia anodowego, to uchronimy układ przed wzrostem napięcia do 484 V. Obniżymy w ten sposób napięcie pracy kondensatorów o około 24 V (484...460 V), ale jeśli przepalą się włókna żarzenia lampy lub lampka zostanie wyjęta przy pracującym wzmacniaczu, to mimo wszystko napięcie wzrośnie i może uszkodzić kondensatory. Stosując w miejscu typowego filtra CRC o spadku napięcia ok. 50 V filtr CRC o zmniejszonej rezystancji „R”, ale uzupełniony układem aktywnym na tranzystorze MOSFET, możemy zmniejszyć napięcie robocze kondensatorów o kolejne 20...25 V. Możemy też w miejsce rezystora anodowego Ra włączyć jako obciążenie aktywne (SRPP) lampę o małym napięciu roboczym Ua, a dużym dopuszczalnym napięciu pracy „katoda-żarzenie”. Tutaj sprawdzi się lampa ECC99. Układ SRPP linearyzuje charakterystykę wyjściową stopnia wzmacniającego – będzie on przedstawiony po omówieniu aplikacji lampy ECC99 w konfiguracji WK.

**LAMPY ECC99**

Punkt pracy dla charakterystyki typowej tej lampy ma następujące parametry: Ua=150 V, Ia=18 mA, Us=-4.0 V. Moc  $P = 150V \times 0.018A = 2.7W$  i przy mocy maksymalnej  $P_{max} = 5.0W$  współczynnik  $n_p = 0.54$  ma stosunkowo niedużą wartość. Charakterystyka opisana dalej została przystosowana do współpracy w konfiguracji kaskadowej z lampą 6SN7, stąd natężenie prądu Ia=22,5 mA. Moc zwiększono do 3,6 W, a współczynnik wzrósł do wartości  $n_p = 0.72$ .

Na wykresie rodziny charakterystyk anodowo-siatkowych wyznaczono wykreślić także współczynnik amplifikacji  $\mu$ . W nowym punkcie pracy wyniósł 23,25, ale dokonano sprawdzenia w punkcie pracy charakterystyki typowej i wyniósł też 23,25, więc przyjęto wartość katalogową  $\mu = 22$ . Jak można zauważyć na rysunku 2b, napięcie zasilania jest znacznie niższe od tego wymaganego dla lampy 6SN7, a nawet są jeszcze pewne rezerwy, bo dla przyjętego klasycznego filtra CRC spadek napięcia wynosi 67 V, więc jest większy od założonych 50 V, a napięcie anodowe Ra też wzrosło z 150 V do 160 V.

Wzmocnienie stopnia wyznaczone z wykresu wynosi  $V_{pp_{wy}}/V_{p_{we}} = 139/8 = 17.4$ . Wyznaczone analitycznie rezystancje  $R_a = 7.5k\Omega$ ,  $R_s = 220k\Omega$ , więc  $R_o = R_a || R_s = 7.25k\Omega$ ,

$$k_u = -\frac{22}{1 + \frac{2.2}{7.25}} = -16.9$$

**Obciążenie aktywne (SRPP)**

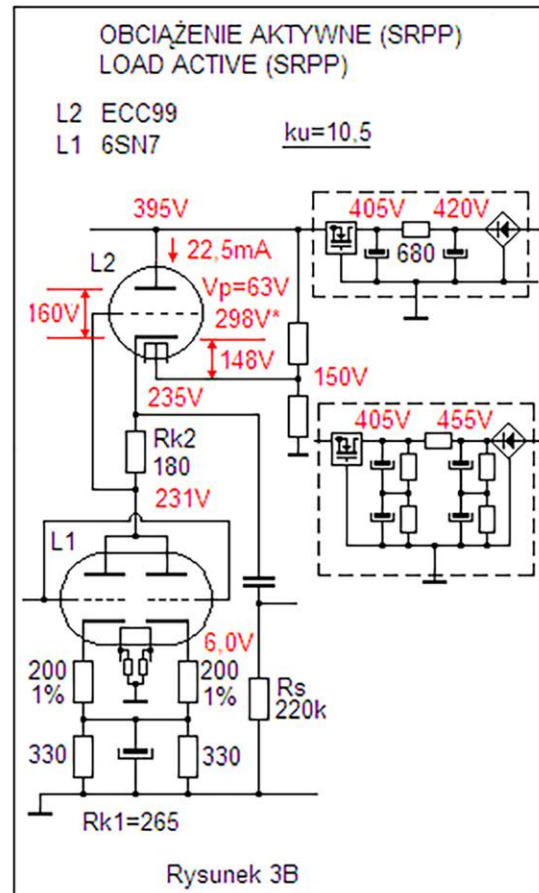
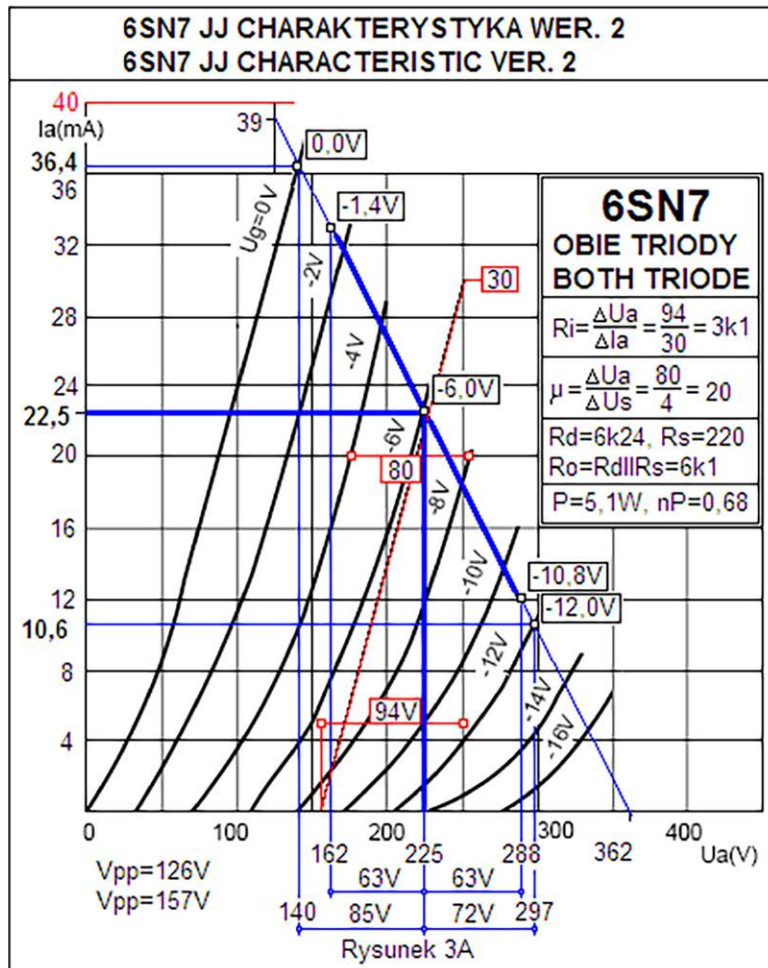
Aplikację tę można polecić zwolennikom „dźwięku” lampy 6SN7. Wybrano duże napięcie pracy stopnia wynoszące aż 395 V, przy spadku napięcia na aktywnym filtrze CRC wynoszącym 25 V da napięcia na wejściu zasilacza 420 V. Mała wartość rezystancji „R” 680  $\Omega$  może niekorzystnie wpłynąć na pasmo przenoszenia wzmacniacza w zakresie częstotliwości najniższych. Lepszym rozwiązaniem będzie zaprojektowanie zasilacza na napięcie wyższe, jak pokazano na rysunku 3b.

Wcześniejsze porównania wyników otrzymywanych metodą graficzną wykazały, że są one nieco lepsze od otrzymanych metodą analityczną. Dotyczyło to szczególnie współczynnika amplifikacji „ $\mu$ ” i wzmocnienia „ $k_u$ ”. Celowe więc będzie przeprowadzenie obliczeń obydwojema metodami przed ich końcową interpretacją. Do wzoru na obliczenie współczynnika wzmocnienia w miejsce pasywnej rezystancji anodowej Ra wprowadzimy oporność dynamiczną, która dla układu SRPP wyrażona będzie wzorem  $R_{dyn} = R_{k2} \cdot (1 + \mu_{L2}) + R_{iL2}$ .

Dla lampy L2 dane wynoszą  $R_{k2} = 180\Omega$ ,  $\mu_{L2} = 22$ ,  $R_{iL2} = 2.2k\Omega$ . Oporność dynamiczna wyniesie  $R_{dyn} = 0.18 \cdot (1 + 22) + 2.2 = 6.34k\Omega$ , oporność obciążenia

$$R_o = \frac{R_{dyn} \cdot R_s}{R_{dyn} + R_s} = \frac{6.34 \cdot 220}{6.34 + 200} = 6.16k\Omega, \text{ wzmocnienie:}$$

$$k_u = -\frac{22}{1 + \frac{2.2}{7.25}} = -16.9$$



Rysunek 3. Charakterystyka lampy 6SN7 (A) oraz rozwiązanie aktywnego obciążenia (B)

Odczytane z wykresu wzmocnienie przy braku lokalnego sprzężenia zwrotnego wynosi:  $V_{pp_{wy}}/V_{pp_{we}} = 157/12 = 13,1$ , więc rozbieżność pomiędzy metodami nie jest znacząca.

Układ zaprojektowano z częściowym lokalnym sprzężeniem zwrotnym na podzielonym rezystorze katodowym a współczynnik wzmocnienia został wyznaczony wykreślnie i wynosi 10,5.

Rezystor katodowy Rk1 składa się z aż 4 oporników. Został tak zaprojektowany, bo dokonując pomiaru spadków napięć, możemy wyliczyć, w jakim stopniu jest obciążona każda z triod. Moc dopuszczalna lampy wynosi 5,0 W dla każdej triody, natomiast przy ich połączeniu równoległym moc maksymalną obniżono z 10 W do 7,5 W z uwagi na możliwą rozbieżność parametrów. Teoretycznie może się zdarzyć, że jedna z triod będzie pracowała z mocą 5,0 W a druga z mocą 2,5 W. Informacja wynikająca z pomiaru napięcia pozwoli na przeciwdziałanie możliwym konsekwencjom, np. skróceniu żywotności lampy.

Rozdzielenie rezystorów na osobne dla każdej z triod ogranicza też przepływ prądów wyrównawczych pomiędzy triodami, choć w tym przykładzie oddziaływanie to będzie niewielkie, bo rezystancja zastępcza dwóch 200-omowych oporników wynosi 100  $\Omega$ , a ta odniesiona do oporności wewnętrznej lampy 3,1 k $\Omega$  daje zaledwie ok. 3-procentowy wpływ na ograniczenie przepływu prądów wyrównawczych. Rozdzielenie dolnych rezystorów 330  $\Omega$  poprawi tę sytuację.

Na rysunku 3B zostało też zaproponowane „podbicie” napięcia na włóknie żarzenia lampy mniej więcej symetryczne z pozostawieniem ok. 50 V zapasu dla każdej z polaryzacji katod duotriody.

Spadek napięcia na lampie L2 wynosi 164 V, co przy prądzie 0,0225 A daje moc wydzieloną w postaci ciepła 3,7 W. Lampę tę można zastąpić równoważnym rezystorem 7,29 k $\Omega$  (najbliższe wartości zgodne z typoszeregiem E24 to 6,8 k $\Omega$  i 7,5 k $\Omega$ ). Oporność dynamiczna lampy górnej wynosi 6,16 k $\Omega$ , jeżeli więc zdecydujemy się w oparciu o tę aplikację zbudować stopień w układzie WK, to dla rezystora np.

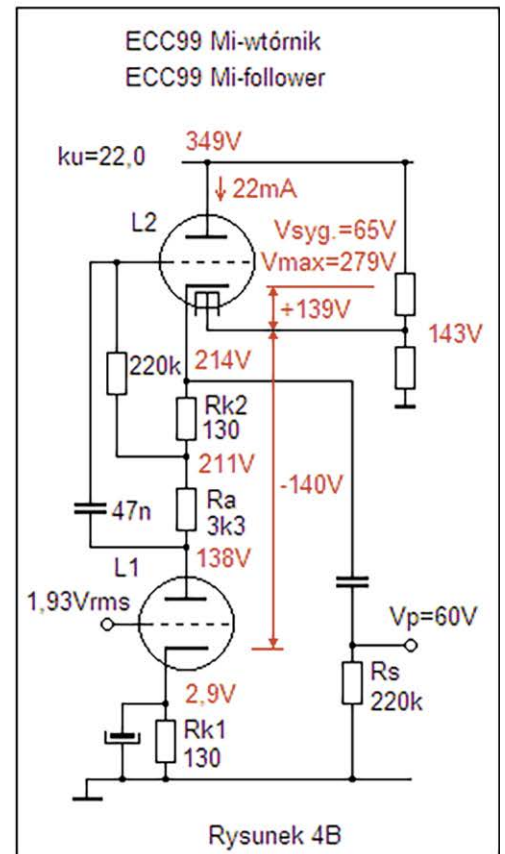
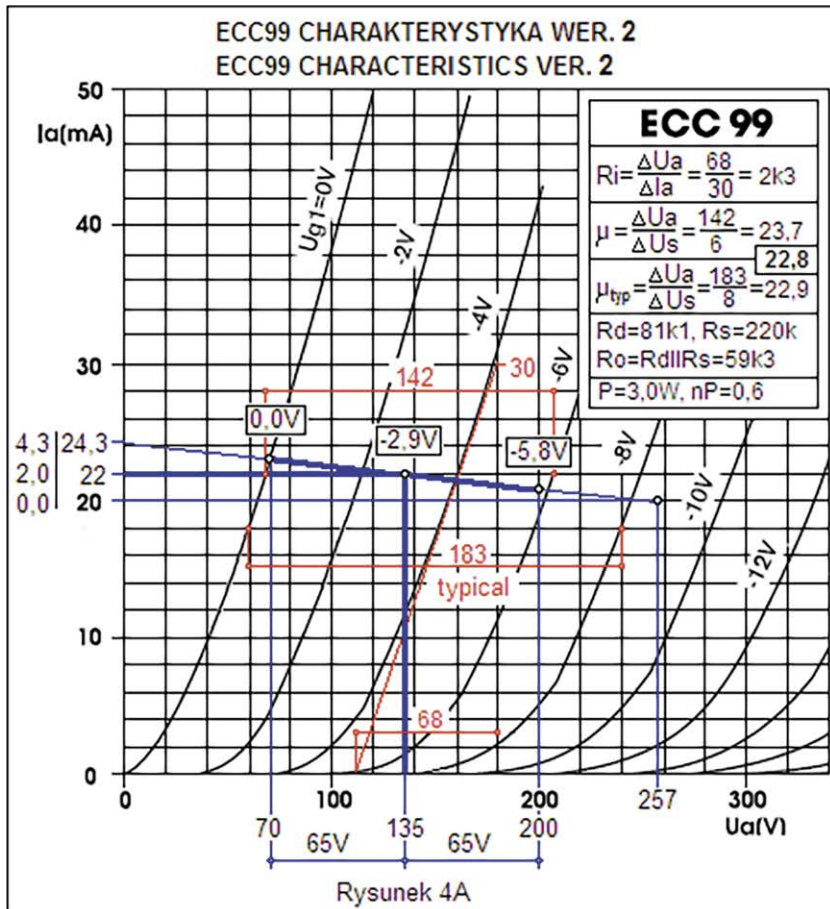
6,8 k $\Omega$ , wykreślając „na papierze” charakterystykę, otrzymamy linio-wość nieco lepszą i będziemy mogli też obniżyć napięcie zasilania o ok. 14...15 V, jednak zastosowanie lampy zmniejsza oporność wyjściową układu i „wyprowadza” z obudowy wzmacniacza moc ciepłą ok. 7,5 W dla obu kanałów. Jeżeli więc zależy nam, aby w naszym wzmacniaczu znalazła się 6SN7, to możemy zapewnić jej dobre samopoczucie towarzystwem ECC99.

### Stopień sterujący w układzie Mi-wtórnik

W układzie pracy Mi-wtórnik charakterystyka obciążenia przebiega bardziej płasko niż omówionych wyżej przykładach, przez co napięcie siatkowe może być niższe i będzie trzeba zwiększyć prąd anodowy, aby utrzymać moc pracy na założonym poziomie.

Moc oddawana podczas pracy lampy dla charakterystyki typowej jest dość mała, o czym wspomniano wcześniej i wynosi 2,7 W. Dla omawianej aplikacji przyjęto jej zwiększenie do 3,0 W, więc zwiększy się współczynnik mocy i wyniesie  $n_p = 0,6$ . Przesuwając charakterystykę pracy w stronę wyższego napięcia siatkowego (w lewo), uzyskamy nieco większy współczynnik amplifikacji  $\mu$ . Wyznaczony graficznie wyniósł 23,7, ale dla sprawdzenia został też wyznaczony współczynnik dla charakterystyki typowej i jego wartość wyniosła 22,9. W karcie katalogowej wynosi on 22, więc bliższą prawdzie jego wartość trzymamy, mnożąc wielkość katalogową przez współczynnik wynikający z ilorazu otrzymanych wykreślnie wartości w nowym punkcie pracy przez ten dla charakterystyki typowej:  $ku = 23,7/22,9 \times 22 = 22,8$ .

Do wyznaczenia współczynnika wzmocnienia stopnia „ku” podany wcześniej wzór na oporność dynamiczną układu SRPP, po uwzględnieniu rezystancji anodowej „Ra”, nieco się zmieni i przyjmie postać:  $R_{dyn} = (R_{k2} + Ra) \cdot (1 + \mu_{L2}) + R_{iL2}$ . Dla omawianego układu:  $R_{dyn} = (0,13 + 3,3) \cdot (1 + 22,8) + 2,3 = 83,9$  k $\Omega$ . Oporność obciążenia



Rysunek 4. Charakterystyka lampy ECC99 oraz rozwiązanie Mi-wtórника

$R_o = R_{dyn} || R_s = 60,7 \text{ k}\Omega$ , współczynnik wzmocnienia:

$$k_u = -\frac{\mu_{L1}}{1 + \frac{R_{iL1}}{R_o}} = -\frac{22,8}{1 + \frac{2,3}{83,9}} = 22,2$$

Czułość wejściowa przy wymaganej do pełnego wystereowania stopnia końcowego amplitudzie  $V_{pp} = 120 \text{ V}$  wyniesie:

$$V_{pp_{WE}} = 120 \text{ V} / 22,2 = 5,4 \text{ V}, \text{ czyli}$$

$$\frac{5,4}{2\sqrt{2}} = 1,91 \text{ V}_{RMS}$$

, co wystarczy do wystereowania wzmacniacza sygnałem z odtwarzacza CD bezpośrednio z poziomu stopnia sterującego.

## Na koniec

Podane przykłady nie wyczerpują możliwości zastosowania innych rozwiązań czy kombinacji połączenia ze sobą lamp 6SN7 i ECC99, a przedstawione zostały jako jedne z ciekawszych. Będą one przedstawione w przewidzianych do prezentacji modelowych wzmacniaczach na lampie końcowej 6S33S, popularnym „diabełku”, z czego pierwszy przygotowywany jest do publikacji na łamach „Elektroniki dla Wszystkich” i będzie wykonany w oparciu o aplikację w konfiguracji Mi-wtórника, a drugi bardziej audiofilski, na łamach „Elektroniki Praktycznej” ze stopniem sterującym w konfiguracji SRPP i stopniem końcowym o podwyższonej mocy przy pracy na dwóch włóknach żarzenia.

Zbigniew Dyał

## Bibliografia:

1. „Lampy elektronowe w aplikacjach audio”, Aleksander Zawada, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2004.
2. „Akrobatyka układów lampowych”, Jerzy Grnaderjan, „Elektronika Praktyczna” 1/2012.
3. „Redukcja zakłóceń w lampowych wzmacniaczach m.cz. (1)”, Jerzy Grnaderjan, „Elektronika Praktyczna” 5/2010.

REKLAMA

# ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA

## na facebook

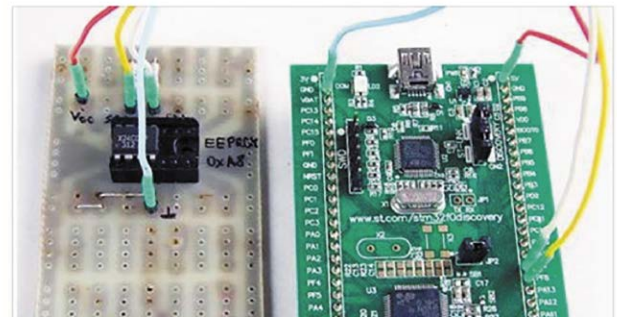
<https://www.facebook.com/ElektronikaPraktyczna>



Elektronika Praktyczna

2 października · 6

Podczas budowania systemów mikroprocesorowych wyposażonych w zewnętrzne układy pamięci często jest potrzeba podglądu i modyfikowania ich zawartości. O ile z dostępem do wewnętrznej pamięci mikrokontrolera najczęściej nie ma problemu (realizuje to programator/debugger), o tyle z dostępem do pamięci zewnętrznych, dołączonych do mikrokontrolera, nie jest już tak łatwo. Można oczywiście posiłkować się specjalnie utworzonymi do tego celu funkcjami, umieszczanymi w program... Zobacz więcej



ep.com.pl

EPCOM.PL