

Wzmacniacze lampowe – przeżytek, czy krzyk mody (1)

Wzmacniacze lampowe przeżywają swój renesans. Najnowsze opracowania różnią się jednak znacznie od konstrukcji sprzed lat, warto więc może się z nimi zapoznać.

Pomimo rozwoju technologii półprzewodnikowych i opracowywania coraz to nowych typów elementów istnieje grupa audiofilów, a także muzyków zawodowych, którzy uważają, że wzmacniacze lampowe brzmią najlepiej. Lampowy "ciepły" dźwięk ceniony jest zwłaszcza przez grających na gitarach basowych. Chociaż może się to wydawać nieprawdopodobne, warto przyjrzeć się bliżej pewnym racjom, które za tym przemawiają.

Pomijając niedogodności związane z potrzebą zasilania grzejnika katody oraz stosunkowo wysokiego napięcia zasilającego anodę, lampy są elementami łatwymi do sterowania. Dla małych częstotliwości siatka sterująca lampy ma rezystancję rzędu 100 MΩ, jednak bez dużej równoległej pojemności (rzędu nF) jak w V-MOSach. Charakterystyki lampy, jako elementu realizowanego na drodze mechanicznej, są znacznie bardziej powtarzalne od charakterystyk półprzewodników, w których

dotąd dodatkowo dochodzą różnice między elementami komplementarnymi. Różnice te musi wyrównywać pętla silnego sprzężenia zwrotnego. W rezultacie więc lampowy stopień wyjściowy wzmacniacza, pracujący w klasie AB, może być bardziej liniowy niż jego półprzewodnikowy odpowiednik, szczególnie, gdy ujemne sprzężenie zwrotne jest płytkie.

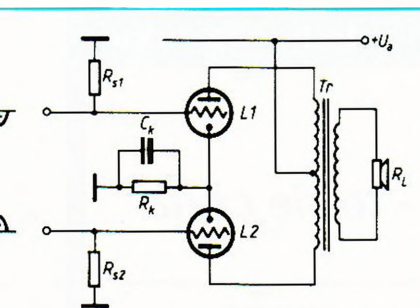
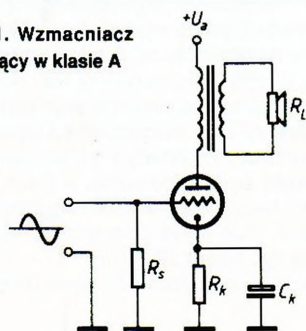
Konwencjonalny układ wzmacniacza

Najprostszą formą lampowego stopnia mocy jest pojedynczy układ triodowy pracujący w klasie A, który jest przedstawiony na rys. 1. Lampa ma ograniczony prąd anody oraz dużą wewnętrzną rezystancję, dlatego do sterowania głośnika niezbędny jest odpowiedni transformator dopasowujący. Teoretyczna sprawność takiego układu wynosi 50%, praktyczna jest o połowę mniejsza. Jeszcze do niedawna wydawało się, że układ ten, stosowany w tanim sprzęcie radiofonicznym, odszedł do przeszłości.

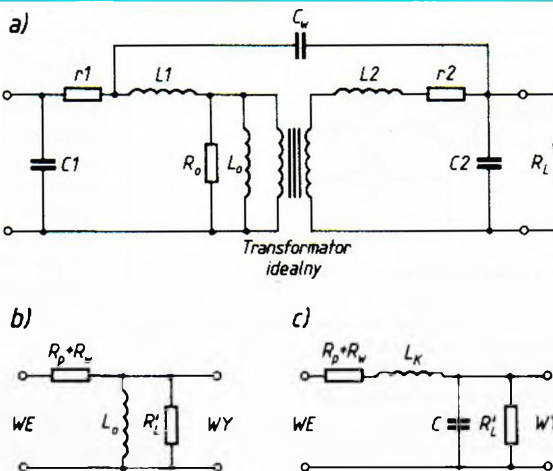
Jednak "akustyczni purytanie" nie tylko wskrzesili go, ale i postawili na piedestał. (Współczesny pojedynczy triodowy wzmacniacz mocy wyceniany jest na ok. 40 tys. dolarów).

Rozwiązaniem uważanym za konwencjonalne we wzmacniaczach mocy jest układ przeciwsoalny, którego układ przedstawiono na rys. 2. Dla uproszczenia, lampy są przedstawione jako triody. Anody lamp są dołączone do uzwojenia pierwotnego transformatora, którego środek łączy się z szyną zasilającą. Z uwagi na brak lamp komplementarnych jest to jedyne sensowne rozwiązanie. Znane były co prawda przeciwsoalne wzmacniacze lampowe beztransformatorowe, ale ponieważ wymagały one głośników o rezystancji rzędu 1 kΩ, nie znalazły większego praktycznego zastosowania. Gdy do siatek lamp zostaną doprowadzone sygnały przesunięte w fazie o 180°, uzyskuje się typowe działania "push-pull". W układzie takim następuje kasowanie jednokowych zniekształceń nieliniowych, zakłóceń pochodzących z zasilacza, itp.

Rys. 1. Wzmacniacz pracujący w klasie A



Rys. 2. Konwencjonalny przeciwsoalny układ lampowy



Rys. 3. Transformator

a – model rzeczywisty

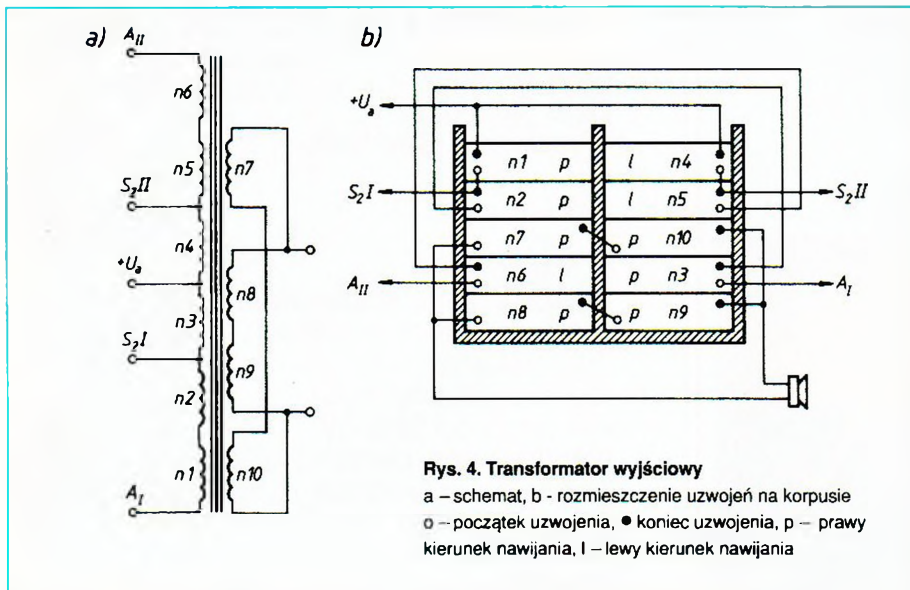
r_1 – rezystancja uzwojenia pierwotnego, L_1 – indukcyjność rozproszenia uzwojenia pierwotnego, r_2 – rezystancja uzwojenia wtórnego, L_2 – ekwiwalent indukcyjności rozproszenia uzwojenia wtórnego, R_0 – ekwiwalent strat w rdzeniu, L_0 – indukcyjność uzwojenia pierwotnego (indukcyjność główna), C_1 , C_2 – ogólna pojemność uzwojenia pierwotnego i wtórnego, C_w – pojemność międzyuzwojeniowa, R_L – obciążenie po stronie wtórnej,

b – schemat zastępczy dla małych częstotliwości

R_p – rezystancja anody, R_w – rezystancja uzwojeń, L_0 – indukcyjność uzwojenia pierwotnego (indukcyjność główna), R_L' – obciążenie uzwojenia wtórnego przeniesione na stronę pierwotną,

c – schemat zastępczy dla wielkich częstotliwości

L_k – indukcyjność rozproszenia, C – pojemność uzwojeń



Transformator wyjściowy

Głównym problemem w lampowych stopniach mocy jest transformator wyjściowy. Nadmienić tu należy, że podobne kłopoty są z transformatorami stosowanymi w półprzewo-

dnikowych wzmacniaczach radiowęglowych. W transformatorze rzeczywistym, w odróżnieniu od teoretycznego, należy rozpatrzyć wpływ indukcyjności głównej L_0 transformatora, na dobre odtwarzanie basów. Podobnie, wpływ indukcyjności rozproszenia oraz pojemności

uzwojeń na pasmo przenoszenia od góry. Model rzeczywistego transformatora oraz schemat zastępczy transformatora dla małych i wielkich częstotliwości przedstawiono na rys. 3.

Jak wynika ze schematów zastępczych, transformator powinien mieć dużą indukcyjność główną L_0 .

Dla wielkich częstotliwości wartość indukcyjności głównej nie ma wpływu, istotna jest natomiast indukcyjność rozproszenia, która w połączeniu z pojemnością uzwojeń tworzy filtr dolnoprzepustowy. Indukcyjność rozproszenia oraz pojemność uzwojeń zależą od budowy transformatora. Niezbędne jest w tym przypadku sekcjonowanie uzwojeń.

Zniekształcenia częstotliwościowe transformatora zależą od rezystancji anody. Jest to jeden z argumentów za triodowym stopniem wyjściowym, gdyż trioda ma mniejszą rezystancję anody niż pentoda. W praktyce jednak stosowane są pentody.

Budowę transformatora wyjściowego przedstawiono na rys. 4. Jest on przeznaczony do pracy ze stopniem wyjściowym typu "ultra linear".

Maciej Feszczuk

Słowa kluczowe: WZMACNIACZ MOCY LAMPY

Wzmacniacz ze stopniem wyjściowym "ultralinear"

Na rysunku 5 przedstawiono praktyczny układ wzmacniacza ze stopniem wyjściowym typu "ultralinear". Poprawa liniowości pracy tego stopnia jest związana z ujemnym sprzężeniem zwrotnym, doprowadzonym z odczepów transformatora wyjściowego do drugich siatek lamp mocy. Licząc od strony napięcia zasilającego, odczep został wykonany po nawinięciu 43% zwojów.

W stopniu wejściowym pracuje pentoda EF86. Do katody tego stopnia jest doprowadzona ogólna pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego. Stopień pierwszy jest sprężony galwanicznie z odwracaczem fazy, wykonanym z podwójną triodą ECC83.

Odwracacz fazy pracuje w układzie różnicowym z niesymetrycznym wejściem. Drugie wejście jest odsprężone do masy kondensatorem C7 o wartości 0,25 μ F.

Ujemne napięcie potrzebne do spolaryzowania siatek sterujących lamp stopnia końcowego (EL34) jest uzyskiwane z tzw. "automatycznego minusa", co sprowadza się do umieszczenia rezystorów o wartościach po 470 Ω w katodach tych lamp. Aby nie wprowadzać katodowego ujemnego sprzężenia zwrotnego, które niekorzystnie zwiększyłoby impedancję wyjściową i ograniczyło wzmocnienie, równoległe do tych rezystorów włączono kondensatory po 50 μ F. Dla małych częstotliwości sprzężenie będzie jednak występować. Rezystancja "widziana" z katod lamp EL34 wynosi około 100 Ω , co wraz z rezystorami katodowymi daje około 75 Ω . Wymagana wartość kondensatora wynosiłaby więc 2000 μ F. Tak duża pojemność może wywoływać jednak chwilowe przeciążenia, które mogą być przyczyną zniekształceń.

Wzmacniacze lampowe

- przeżytek, czy krzyk mody? (2)

Sposoby zmniejszania rezystancji wyjściowej

Idealnym rozwiązaniem jest zmniejszenie rezystora katodowego do wartości 1 Ω lub mniej, a wymagane napięcie polaryzujące siatkę można wytwarzać wzmacniając i prostując napięcie pobierane z tego rezystora. Układ tego typu jest przedstawiony na rys. 6.

Ujemne napięcie wynosi tu -11 V, ale łatwo można je zmodyfikować do innej, wymaganej wartości. Wymagania odnośnie poprawy przenoszenia niskich tonów są związane z indukcyjnością główną transformatora. Jak wynika z rys. 3, jeżeli impedancja wyjściowa dąży do zera, wymagana indukcyjność pierwotna również dąży do zera. Zniekształcenia wprowadzane przez transformator zależą również od rezystancji anody i zmniejszają się wraz z jej spadkiem. Można co prawda zastosować wtórnikowy stopień wyjściowy, podobnie jak to ma miejsce w konstrukcjach półprzewodnikowych, jednak amplituda napięcia potrzebnego doysterowania takiego układu czyni z niego raczej ciekawostkę teoretyczną, niż wskazówkę do konstrukcji praktycznych. Istnieje jednak inna metoda zmniejszająca rezystancję wyjściową. Jest nią wprowadzenie sprzężenia zwrotnego w obwodzie anodowym. Rozpatrzmy układ konwencjonalnego wzmacniacza napięciowego przedstawionego na rys. 7a.

Jeżeli wzmocnienie napięciowe w otwartej pętli wzmacniacza jest bardzo duże, wówczas właściwości wzmacniacza są określone przez stosunek rezystancji R2/R1. Zastępując rezystor R1 przez źródło stałoprądowe (rys. 7b) wzmacniacz "widziałby" 100% ujemne sprzężenie zwrotne. Napięcie wyjściowe będzie się wyrażało zależnością:

$$U_{wy} = I \cdot R_2$$

Zakładając, że funkcja określająca zależność między prądem wyjściowym źródła a napięciem wejściowym jest określana przez stosunek:

$$g_n = I / U_{we}$$

ostateczny wzór na napięcie wyjściowe będzie następujący:

$$U_{wy} = U_{we} \cdot g_n \cdot R_2$$

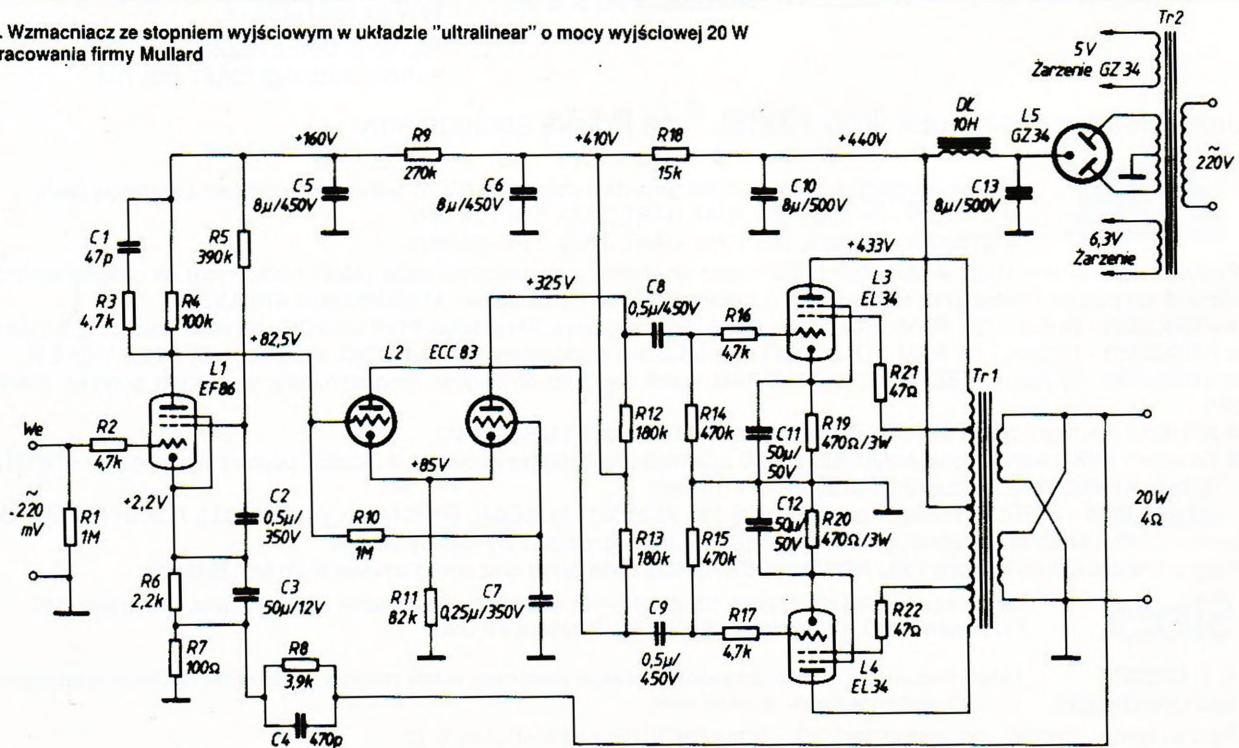
Zniekształcenia wprowadzane przez układ będą bardzo małe, ponieważ współczynnik sprzężenia zwrotnego jest prawie jednością. Zastępując wzmacniacz lampą uzyskamy układ przedstawiony na rys. 7c.

Wzmacniacz operacyjny US1 wraz z tranzystorem T1 stanowi przetwornik napięcie/prąd i dość dobrze symuluje źródło stałoprądowe. Prąd spoczynkowy płynący przez kolektor tranzystora T1 wynosi:

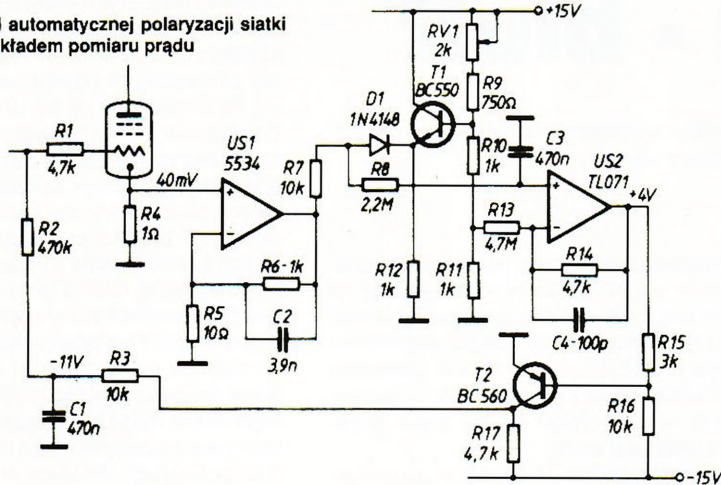
$$I_C \approx I_E = U_1 / R_1$$

Signal zmienny doprowadzony do wejścia będzie modulował prąd spoczynkowy, wytwarzając na wyjściu żądany przebieg.

Rys. 5. Wzmacniacz ze stopniem wyjściowym w układzie "ultralinear" o mocy wyjściowej 20 W wg opracowania firmy Mullard



Rys. 6. Układ automatycznej polaryzacji siatki sterującej z układem pomiaru prądu



dwa wzmacniacze operacyjne sprzężone w sposób znany z układów mostkowych, możnaysterować stopień przeciwsobny. Układ ten jest przedstawiony na rys. 8.

Wzmacniacze operacyjne US1 i US2 pracują w układzie przetworników napięcie – prąd o układzie bardzo zbliżonym do przedstawionego na rys. 7c. Spoczynkowy prąd kolektora tranzystorów T1 i T2 można wyznaczyć z wyrażenia:

$$I_C \approx I_E = \frac{8V}{R_{12}} \frac{R_2}{R_3} = \frac{8V}{68k\Omega} \frac{10k\Omega}{1,8k\Omega} = 0,65mA$$

Zastosowane napięcie zasilania wzmacniacza operacyjnego (+8 V) wynika z wykorzystania do tego celu wyprostowanego napięcia żarzenia. Można oczywiście zasilac wzmacniacze z typowych stabilizowanych napięć $\pm 15 V$, zmieniając odpowiednio wartość rezystorów R12 i R13 tak, aby zachować wymaganą wartość prądu spoczynkowego tranzystorów T1 i T2.

Sygnal wejściowy jest doprowadzony do wejścia nieodwracającego wzmacniacza US1. Wartość rezystancji wejściowej wyznacza rezystor R1. Wzmacniacz US1 w połączeniu z tranzystorem T1 tworzy omawiany poprzednio przetwornik napięcie/prąd. Prąd wyjściowy pobierany z kolektora tranzystora T1 płynie przez rezystor R7, łączący dla przebiegów zmiennych anodę z siatką lampy L1. Kondensator C1 separuje siatkę lampy od napięcia stałego, obecnego na kolektorze tranzystora T1. Polaryzację siatek sterujących stopnia wyjściowego zrealizowano metodą tzw. automatycznego minusa. Wspólny dla obu lamp rezystor katodowy R10 jest zbocznikowany dla przebiegów zmiennych kondensatorem C3. Siatki ekranujące są polaryzowane za pomocą rezystorów R14 i R15. Obie części układu są identyczne. Przesunięcie fazy jest wytwarzane przez połączenie wejść odwracających obu wzmacniaczy dwójnikiem, złożonym z kondensatora C4 i rezystora R11. W wyniku tego powstają na emiterach tranzystorów T1 i T2 dwa sygnały o równych amplitudach a w przeciwnych fazach. Napięcie wyjściowe z lamp L1 i L2 jest dostarczane do uzwojenia pierwotnego transformatora wyjściowego Tr1.

Akustyczny sygnał wyjściowy jest uzyskiwany z uzwojenia wtórnego i dostarczany do głośnika. Rezystor R16 zapewnia bezpieczną pracę stopnia wyjściowego przy braku odpowiedniego obciążenia. Z powodu istnienia lokalnych silnych pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego zastosowanie pętli ogólnej okazało się zbędne.

Podstawowe dane techniczne wzmacniacza przedstawionego na rys. 8 są następujące:

- $P_{WYmax} - 32 W$
- $h (P_{WY} = 20 w) - 0,07\%$
- pasmo przenoszenia $- 5 Hz \pm 55 kHz \pm 3 dB$
- $R_{WY} - < 0,6 \Omega$

Maciej Feszczuk

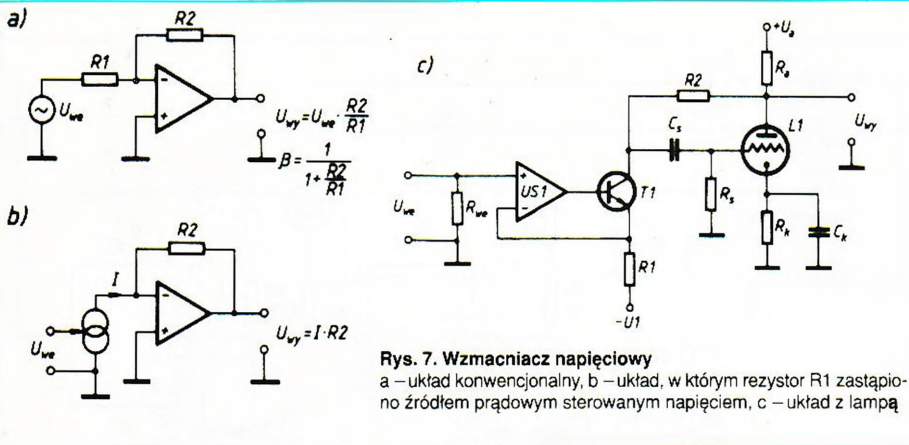
LITERATURA

[1] Hot audio power – Electronics World + Wireless World nr 10/1995

[2] Classic vave power – Electronics World + Wireless World nr 12/1995

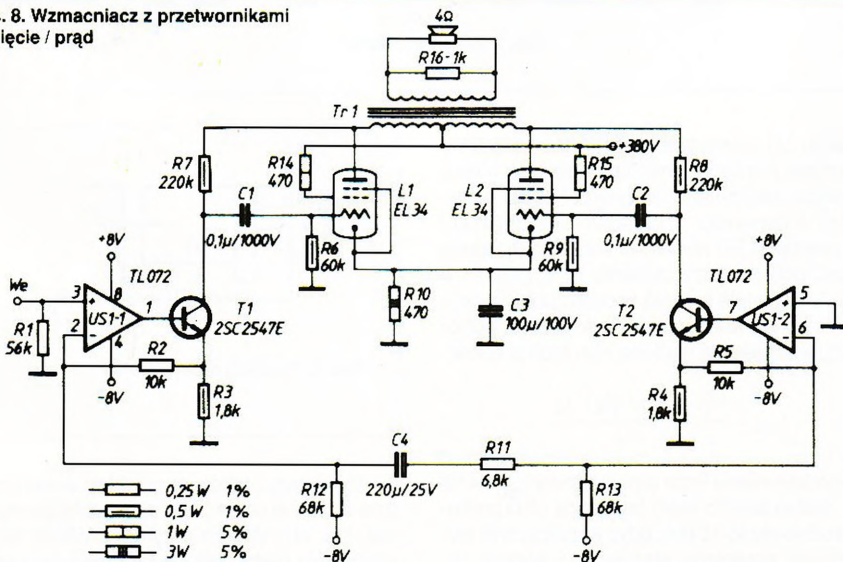
[3] Stereofoniczny zestaw odtwarzający wysokiej jakości – Radioamator nr 5/1970

Słowa kluczowe: WZMACNIACZ MOCY, LAMPY



Rys. 7. Wzmacniacz napięciowy
a – układ konwencjonalny, b – układ, w którym rezystor R1 zastępuje źródłem prądowym sterowanym napięciem, c – układ z lampą

Rys. 8. Wzmacniacz z przetwornikami napięcie / prąd



Dane transformatorów zastosowanych we wzmacniaczu

Transformator wyjściowy

Przekładnia 20:1

Indukcyjność uzwojenia pierwotnego > 8 H

Indukcyjność rozproszenia < 10 mH

Transformator zasilacza

Napięcie anodowe 280 W / 700 mA

Napięcie żarzenia 2 x 6 V / 4 A

W zakresie pasma akustycznego układ ma wyjściową impedancję większą niż 10 M Ω .

Wzmacniacz z przetwornikami napięcie-prąd

Lampowy układ sterujący, chociaż teoretycznie możliwy, jest trudny do wykonania. Stosując