

Stopień mocy wzmacniacza lampowego SE 6C33C

z dwuimpedancyjnym transformatorem wyjściowym

Rosyjska lampa 6C33C była przeznaczona do pracy w układach stabilizacji, a obecnie, z uwagi na swoje walory dźwiękowe i dużą moc, jest chętnie stosowana w aplikacjach audio. Niestety, istnieją też opinie o dużej prądowości i problemach z ustabilizowaniem temperaturowym, co skutkuje niestabilnością parametrów. Rozwiązaniem często stosowanym przez konstruktorów jest ustabilizowanie lampy automatyczną regulacją napięcia siatkowego, uzyskaną na oporniku katodowym, ale wtedy apetyt lampy na prąd jeszcze bardziej wzrasta. Cechą tej podwójnej triody jest też możliwość pracy z włączonym jednym systemem żarzenia, dzięki czemu można by ograniczyć ilość zużywanej energii, jednak takie rozwiązania nie są popularne, więc nie pozostało mi innego wyboru, jak wykonanie własnego opracowania.

Zaprojektowanie wzmacniacza dającego możliwość pracy z obniżoną mocą, utrudniały mi pewne opisane w karcie katalogowej właściwości tej lampy. Chciałem poznać w jaki sposób z tymi problemami poradzi sobie inni konstruktorzy. Przeglądając dostępne aplikacje, moją uwagę zwrócił opis budowy wzmacniacza opublikowany w miesięczniku „Glass Audio” w 1996 r.

Wzmacniacz wg Erno Borbley'a

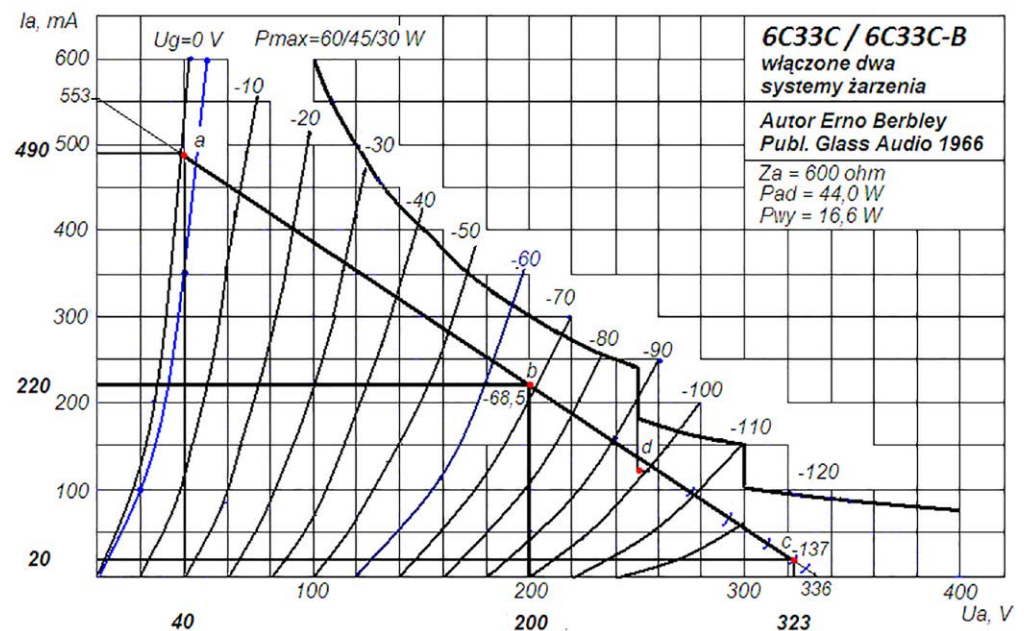
Wspomnianym we wstępie utrudnieniem w zaprojektowaniu stopnia końcowego wzmacniacza był przebieg paraboli mocy maksymalnej, który przy napięciu anodowym 250 V skokowo przechodzi z mocy 60 W na 30 W dla równoległej pracy triod lampy i z 45 W na 30 W dla pracy z włączoną jedną triodą.

Aby poznać warunki pracy lampy, wykreśliłem na charakterystyce katalogowej proste z punktu $U_0=200$ V i $I_0=220$ mA, a punkt ich przecięcia, który wyznacza spoczynkowy punkt pracy, oznaczyłem „b”. Z tego punktu wykreśliłem prostą wyznaczającą impedancję dopasowania 600 Ω . Otrzymany wykres pozwolił na wyciągnięciu wniosku, że impedancja została wyznaczona z punktu przejścia przy napięciu 250 V z mocy 60 W na moc 30 W o współrzędnych: $U_a=250$ V, $I_a=120$ mA lub w pobliżu tego punktu. Zapewne przejście to nie odbywa się w sposób skokowy tylko

płynny, a na charakterystyce katalogowej zostało tak przedstawione dla uproszczenia z uwagi na pierwotne przeznaczenie lampy (rysunek 1). We wspomnianym artykule Erno Borbley pisał też, że szukał transformatora gotowego, a spośród dostępnych na rynku impedancja 600 Ω dawała najlepsze przybliżenie do warunków pracy lampy, co może tłumaczyć powód, dla którego nie projektował transformatora dającego możliwość pełnego wykorzystania dostępnego zakresu prądów anodowych (do 0,6 A dla systemu równoległego) i napięć siatkowych (-0,5...-150 V).

Dane katalogowe lampy

W tabeli 1 umieszczono dane katalogowe lamp 6C33C i 6C33C-B. Czytając dane katalogowe można zauważyć,



Rysunek 1. Przebieg paraboli mocy maksymalnej oraz proste, o których mowa w tekście

że moc maksymalna dla systemu równoległego jest dość mała, bo wynosi tylko 60 W dla dwóch równoległe pracujących triod o łącznej mocy 90 W. Temperatura bańki lampy wzrasta z 200°C dla włączonej pojedynczej triody do 260°C dla włączonych obu triod.

Impedancji dopasowania dla równoległej pracy systemów

Dla pełnego wykorzystania możliwości lampy dobrana impedancja powinna umożliwiać pracę w pełnym zakresie prądu anodowego i napięcia siatkowego, a że lampy najlepiej brzmią przy mocy bliskiej maksymalnej, to punkt spoczynkowy powinien być wyznaczony w jej pobliżu. Na rysunku 2 porównano trzy impedancje dopasowania: 600 Ω, 500 Ω i 425 Ω wykreślone z punktu „a”, to jest maksymalnego prądu anodowego 600 mA.

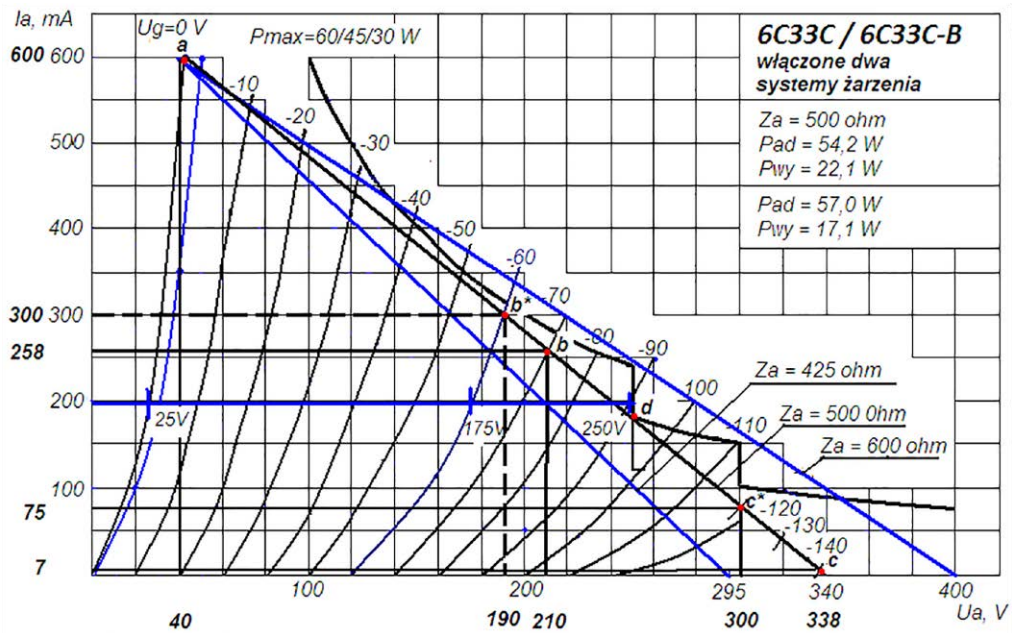
Z rysunków 1 i 2 wynika, że dla chyba najczęściej stosowanej impedancji 600 Ω, spoczynkowy punkt pracy wyznaczony np. dla $I_o = 1/2 \times I_{max}$, to jest $0,3 A \times 220 V = 66 W$ znajdowałby się poza zakresem mocy maksymalnej, natomiast dla wykresu impedancji 425 Ω wyznaczonej z punktu „a” (45 V, 600 mA) do punktu „d” (250 V, 120 mA), ograniczającego moc maksymalną do 30 W, nie byłoby możliwe osiągnięcie mocy maksymalnej 60 W. Wnioski te są słuszne, oczywiście – dla katalogowej charakterystyki pracy przy temperaturze bańki lampy 260°C, a przy schładzania lampy wykresy mogą być inne.

Przyjęcie założenia, że w zakresie napięcia anodowego 250...300 V moc maksymalną będzie wyznaczała hiperbola dla mocy pośredniej pomiędzy 60 W a 30 W, czyli 45 W, pozwala na wyznaczenie impedancji dopasowania lepiej wykorzystującą możliwości lampy. Impedancję tę wyznaczamy pomiędzy punktem „a” o współrzędnych: $U_s = 0 V, I_a = 600 mA, U_a = 45 V$ i punktem „d” o współrzędnych: $I_o = 180 mA, U_o = 250 V$.

$$Z_a = \frac{U_d - U_a}{I_a - I_d} = \frac{250 - 46}{0,6 - 0,18} = 486 \Omega \approx 500 \Omega$$

Wyznaczona impedancja pozwala na osiągnięcie mocy admisyjnej na poziomie 90% Pmax, co jest korzystne zarówno ze względu na walory dźwiękowe najlepsze przy pracy lampy z mocą bliską maksymalnej, jak też z uwagi na zalecenie odnośnie do wyznaczenia punktu pracy lampy – wyznaczenie punktu pracy lampy równego mocy maksymalnej nie jest zalecane.

Na rysunku pokazano też dwa przypadki wyznaczania punktu spoczynkowego. Pierwszy z nich dla dostępnego



Rysunek 2. Porównanie trzech impedancji dopasowania: 600 Ω, 500 Ω i 425 Ω

Tabela 1. Dane katalogowe lamp 6C33C i 6C33C-B

Żywotność lampy	750 godzin		3000 godzin	
	Sys. pojedynczy	Sys. równoległy	Sys. pojedynczy	Sys. równoległy
Moc rozpraszania				
Dla napięć ≤250 V	45 W	60 W	35 W	45 W
Dla napięć >250 V	30 W	30 W	25 W	30 W
Maksymalny prąd anodowy	350 mA	600 mA	250 mA	450 mA
Szczytowy prąd anodowy	700 mA	1200 mA	500 mA	900 mA
Temperatura lampy				
W temp. otocz. 20°C	260°C		200°C	
W temp. otocz. 100°C	300°C		300°C	

zakresu napięcia siatkowego (0...140 V) wyznaczonego w połowie, to jest -70 V, daje możliwość osiągnięcia znacznie większej mocy wyjściowej, ale przy większych zniekształceniach. W drugim wypadku (linia przerywana) spoczynkowy prąd pracy I_o wyznaczamy w połowie maksymalnego prądu I_{max} , $I_o = 1/2 \times I_{max} = 1/2 \times 0,6 A = 0,3 A$, uzyskamy mniejszą moc wyjściową P_{wy} przy niewiele mniejszych zniekształceniach. W obu wypadkach zniekształcenia są jednak duże.

Impedancja dopasowania dla lampy z jednym systemem żarzenia

Dla pracy lampy z jednym systemem żarzenia przebieg wykresu maksymalnej mocy został zmieniony, podobnie jak dla pracy w systemie równoległym, to jest dla napięcia anodowego od 250 V do 300 V, została wyznaczona charakterystyka pośrednia 37,5 W. Maksymalny katalogowy prąd anodowy wynosi 350 mA. Dla tych warunków impedancję dopasowania wyznaczają współrzędne punktu „a” $U_a = 50 V, I_a = 350 mA$ (rysunek 3) i punktu „d” $U_d = 250 V, I_d = 150 mA$ (rysunek 4), a impedancja dopasowania wynosi

$$Z_a = \frac{U_d - U_a}{I_a - I_d} = \frac{250 - 50}{0,35 - 0,163} = 1070\Omega \approx 1000\Omega$$

Z otrzymanego na rys. 3 wykresu można odczytać, że dla impedancji 1000 Ω i przyjętych warunków nie będzie można osiągnąć pełnej mocy lampy 45 W, natomiast liniowość będzie lepsza od liniowości systemu równoległego – moc wyjściowa również będzie dość duża. Jeżeli jednak dane katalogowe zinterpretujemy w taki sposób, że maksymalny prąd anodowy 350 mA odniesiemy do maksymalnej mocy admisyjnej dla spoczynkowego punktu pracy, a jako prąd szczytowy przyjmiemy wartość sygnału akustycznego, to wówczas możemy prostą odpowiadającą impedancji 800 Ω wykreślić dla prądu 400 mA i przyjąć prąd spoczynkowy 200 mA. Impedancja ta lepiej wykorzystuje możliwości lampy w zakresie osiąganey mocy maksymalnej.

Temperaturowe warunki pracy lampy

Poza wspomnianym wcześniej znacznym ograniczeniem mocy występującym przy równoległej pracy obu triod. Gorsza jest też liniowość, bo porównując przyrosty napięcia anodowego w funkcji napięcia siatki, są one mniejsze dla systemu równoległego, co przedstawia tabela 2. Widoczna jest silna zależność osiąganey mocy i liniowości lampy od jej temperatury. Schłodzenie lampy wymuszonym obiegiem powietrza powinno poprawić jej parametry, ale czy wentylator może zastąpić globalną pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego? Powinno okazać się to już wkrótce podczas pomiarów wzmacniacza testowego, którego projekt zostanie opublikowany w Elektronice Praktycznej.

Obliczenie transformatora wyjściowego

Zasadniczym wymaganiem dla projektowanego transformatora dwuimpedancyjnego będzie utrzymanie tej samej lub zbliżonej wartości indukcji magnetycznej w rdzeniu dla systemów pojedynczego i równoległego, co z kolei przełoży się na wielkość szczeliny magnetycznej. Projektowanie można przeprowadzić w dwojaki sposób:

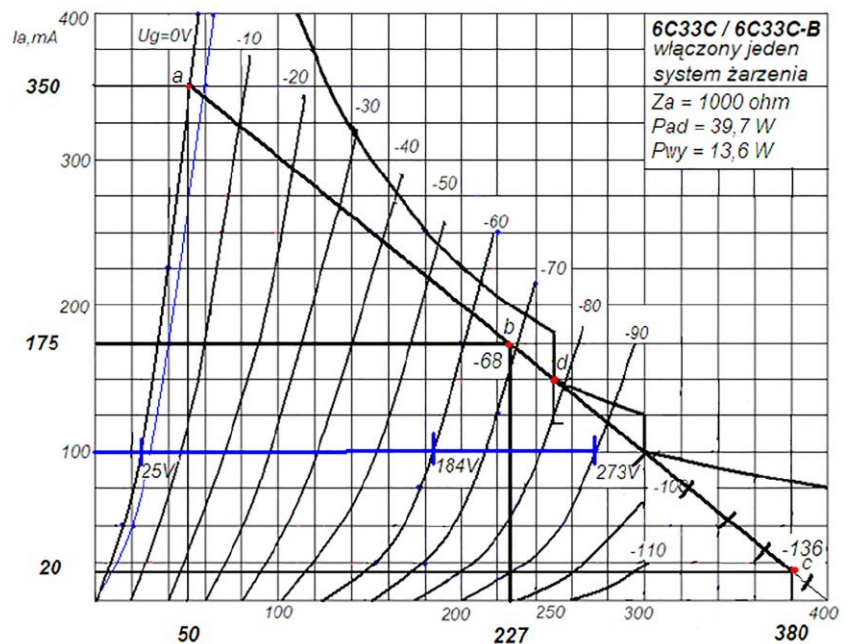
- Obliczenia wykonać dla obu systemów równocześnie do momentu otrzymania wielkości szczelin magnetycznych i wtedy dokonywać korekt.
- Lub obliczyć parametry transformatora dla wybranego np. pojedynczego systemu i po obliczeniu szczeliny magnetycznej, dla zachowania tej samej wartości indukcji magnetycznej w rdzeniu, przeliczyć prąd i ilość zwojów dla systemu równoległego

Tabela 2. Porównanie $U_a=f(U_s)$ w systemie równoległym i z pojedynczą lampą

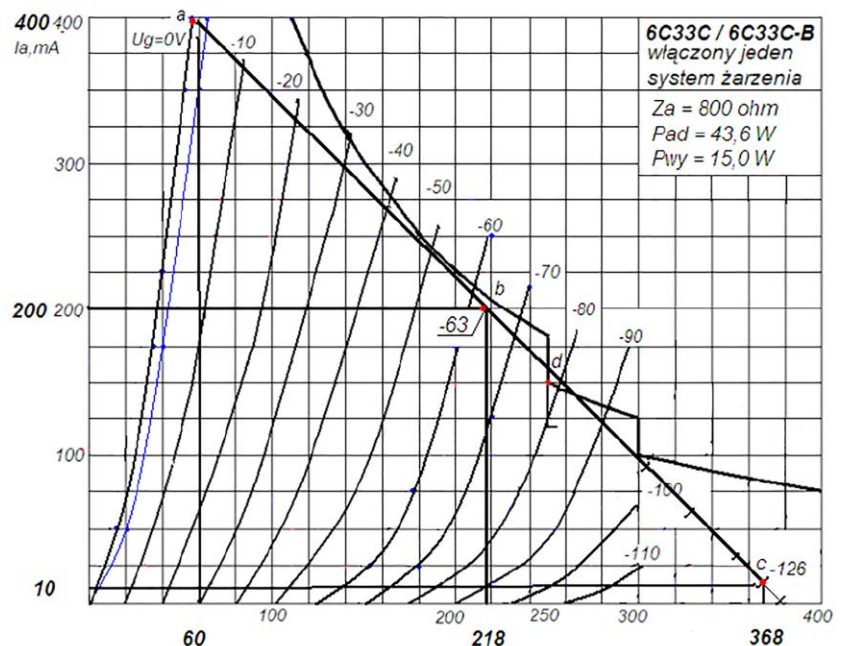
I_a dla systemu	$U_s=0\text{ V}$	$U_s=-60\text{ V}$	$U_s=-90\text{ V}$
Pojedyncza trioda: 100 mA	$U_a=25\text{ V}$	184 V	273 V
System równoległy: 200 mA	$U_a=25\text{ V}$	175 V	250 V

z zależności $I_{0-I} \times n_I = I_{0-II} \times n_{II}$ a następnie, aby zamienić liczbę zwojów na indukcyjność główną drugiego z systemów, skorzystać z empirycznego wzoru

$$L = 1,125 \cdot \frac{n^2 \cdot \mu_{ef} \cdot s}{l_y} \cdot x10^{-8}$$



Rysunek 3. Warunki pracy lampy w punkcie „a”



Rysunek 4. Warunki pracy lampy w punkcie „d”

Pozostałe wzory potrzebne do obliczenia transformatora

1. Indukcyjność główna $L \geq \frac{R_w \times R_o}{R_w + R_o} \times \frac{1}{2 \times \pi \times f_d}$,
gdzie:

- R_w – oporność wewnętrzna lampy,
- R_o – oporność obciążenia,
- f_d – dolne pasmo przenoszenia.

2. Częstotliwość górna: $f_g = \frac{R_o}{2 \times \pi \times L_{II}}$

3. Minimalna objętość rdzenia:

$$V_I = \frac{0,8 \times \pi \times \mu_1 \times \sqrt{P_{II} \times R_o}}{(2 \times \pi \times f_d)^2 \times L_{II} \times B^2}$$

gdzie:

- P – maksymalna moc wyjściowa,
- μ_2 – przenikalność magnetyczna rdzenia (500),
- B – maksymalna indukcja magnetyczna w rdzeniu (dla jakości Hi-Fi można przyjąć 0,2 T).

4. Obliczeniowa liczba zwojów (jak dla rdzenia bez szczeliny):

$$n^* = 8920 \times \sqrt{\frac{L_{II} \times l_r}{0,9 \times \mu \times S}}$$

gdzie:

- l_r – długość drogi magnetycznej w rdzeniu,
- S – przekrój rdzenia.

5. Szczelina magnetyczna: $\sigma = 0,16 \times I_o \times n_{II} \times 10^{-3}$.

6. Przenikalność efektywna dla obliczonej szczeliny magnetycznej:

$$\mu_{ef} = \frac{\mu}{1 + \mu \times \frac{\sigma}{l_r}}$$

7. Liczba zwojów (ze szczeliną):

$$n_{II} = 8920 \times \sqrt{\frac{L_{II} \times l_1}{0,9 \times \mu_{ef} \times S}}$$

8. Częstotliwość dolna f_d :

$$f_d = \frac{R_a \times R_i}{R_a \times R_i} \times \frac{1}{2 \times \pi \times L_I}$$

9. Przekładnia uzwojeń transformatora:

$$\eta = \sqrt{\frac{0,9 \times R_o}{R_g}}$$

po obliczeniu rezystancji uzwojeń:

$$\eta = \sqrt{\frac{R_o - r_1}{R_g + r_2}}$$

10. Średnica drutów nawojowych dla przyjętej gęstości prądu (2,5 A/mm²)

$$d = \sqrt{\frac{4 \times I}{2,5 \times \pi}} [mm]$$

gdzie

$$I = \frac{P}{U}$$

Inne spostrzeżenia i wnioski

Swobodny wybór impedancji dopasowania transformatora zgodnie z upodobaniami może spowodować „obrastanie” wzmacniacza w dodatkowe przełączniki, przekaźniki dla napięć siatkowych, anodowych, impedancji itd. Należałoby więc skoordynować różniące się między systemami parametry pracy, być może też przez wyznaczenie nowych impedancji wg własnych preferencji. Niemniej jednak, z tematu triody, najprostszej lampy wzmacniającej z transformatorem głośnikowym, zaczyna robić się „temat rzeka”.

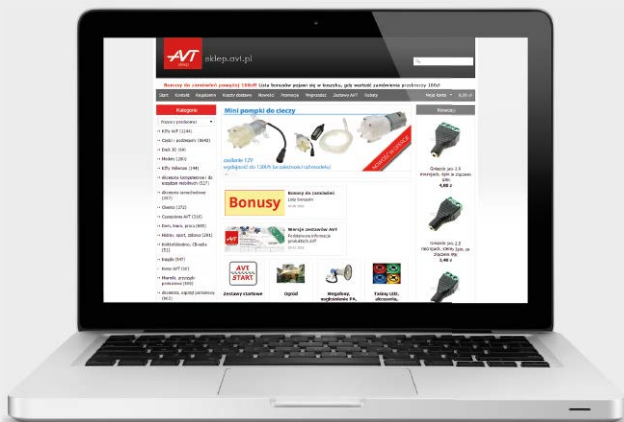
Wielu użytkowników wzmacniaczy prawdopodobnie zadowolili prostszą konstrukcją opartą na wykorzystaniu pojedynczej, atrakcyjnej cenowo w porównaniu do kultowej 300B, triody a w wypadku np. przepalenia się włókna żarzenia, na drugiej triodzie lampa otrzyma „drugie życie”.

Warto też zwrócić uwagę na fakt, że wyznaczanie zakresu pracy przy wyższych prądach anodowych, skutkuje też niższym wymaganym napięciem siatkowym dla pełnegoysterowania lampy, co z kolei może dać możliwośćysterowania sygnałem odtwarzacza CD/DVD podanym bezpośrednio na stopień sterujący, z pominięciem stopnia wyjściowego wzmacniacza.

ZBIGNIEW DYBAŁ

REKLAMA

http://sklep.avt.pl



SKLEP FIRMOWY
(sprzedaż na miejscu,
obsługa zamówień z odbiorem osobistym):

tel.: 22 257 84 66

Sklep stacjonarny
(ul. Leszczyńska 11, Warszawa – Żerań)

czynny w godzinach:

poniedziałek – piątek: 08:00 – 16:45 (czwartek do 17:45)

sobota: 10:00 – 13:45

