

Wzmacniacz lampowy dla nielampowców (2)



cz. I artykułu
dostępna na CD

Doświadczeni konstruktorzy wzmacniaczy lampowych twierdzą, że jakość wzmacniacza najbardziej zależy od sposobu wykonania transformatora głośnikowego. Dlatego część 2 artykułu poświęcona jest głównie obliczeniom i opisowi know-how wykonania transformatora w warunkach domowych. To prawdziwe rękodzieło, ale warto się przyłożyć, by uzyskać niepowtarzalne „lampowe” brzmienie wzmacniacza wykonanego dosłownie własnymi rękami. Wykonanie tego wzmacniacza nie jest trudne, ale wymaga zapachu i cierpliwości prawdziwego hobbysty.

AVT-5142

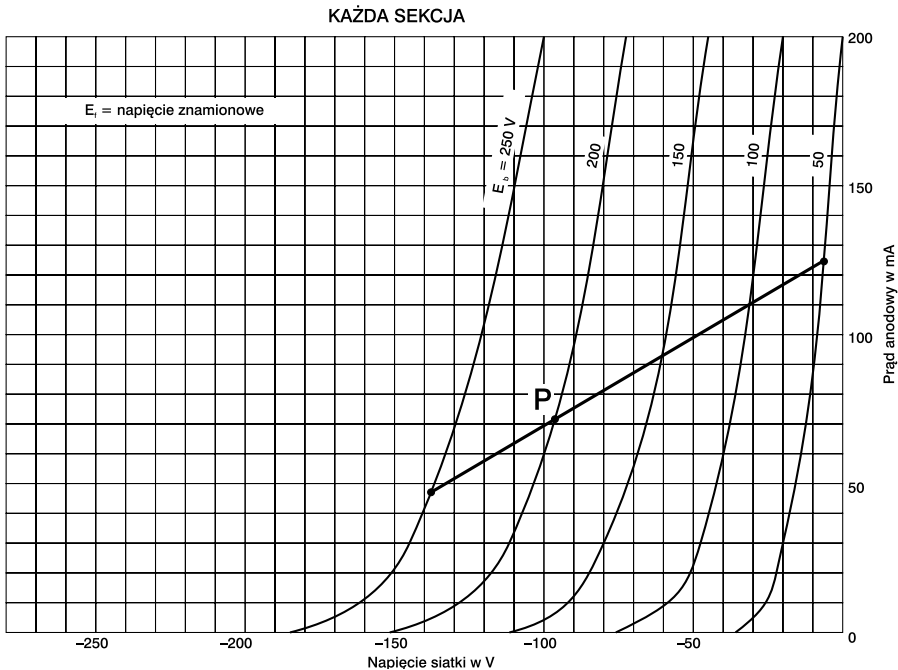
W ofercie AVT jest dostępna:
– [AVT-5142A] – płytka drukowana

PODSTAWOWE PARAMETRY
• Płytkę wyłącznika o wymiarach 62x37 mm, wzmacniacz montowany „na pająka” • Konfiguracja wzmacniacza: układ napięciowy Williamsona • Stopień mocy: triodowy push-pull, klasa AB1 • Stała polaryzacja lamp mocy • Logarytmiczny wskaźnik występowania • Maksymalna moc wyjściowa (bez przesterowania wzmacniacza): 2x7 W (Uwej=1,24 Vrms; f=1 kHz, sinus; THD=1,2%) • Pasmo przy spadku 3 dB: 32 Hz...18,5 kHz • Nominalna impedancja obciążenia: zależna od transformatora (w prototypie 3 Ω) • Czulość wejściowa dla max mocy (2x7 W): 1,24 Vrms

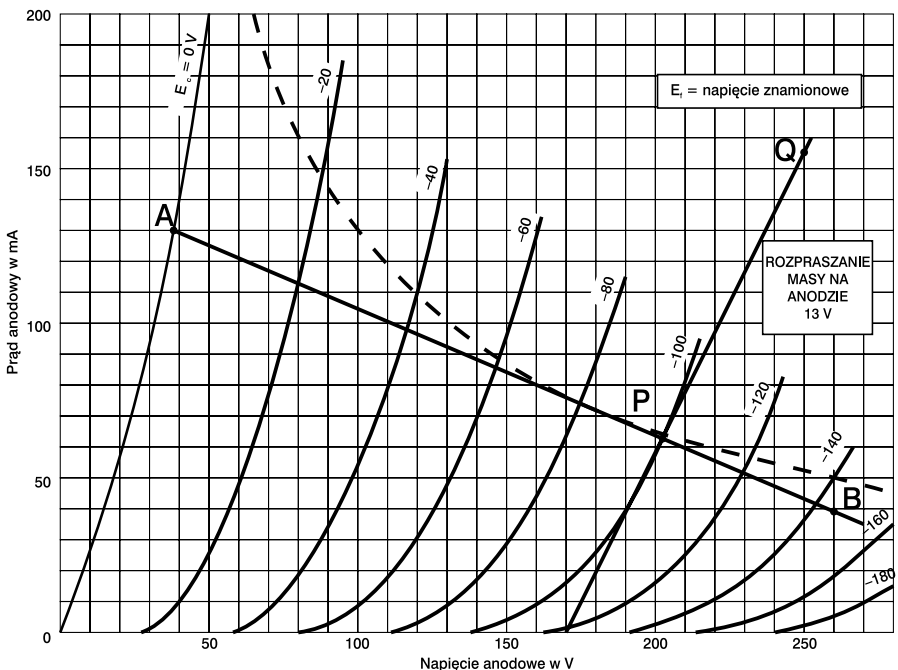


PROJEKTY POKREWNE wymienione artykuły są w całości dostępne na CD		
Tytuł artykułu	Nr EP/EdW	Kit
Bufor lampowy	EdW 12/2003	AVT-2690
Przedwzmacniacz lampowy	EdW 8/2004	AVT-2729
Lampowy wzmacniacz słuchawkowy	EdW 1/2005	AVT-2744
Wzmacniacz lampowy z PCL86	EP 2/2005	AVT-455
Stereofoniczny wzmacniacz lampowy	EdW 6-7/2005	AVT-2754
Lampowy wzmacniacz gitarowy	EdW 12/2005	AVT-2772
Wzmacniacz lampowy na ECL86 w układzie SE	EdW 4/2006	
Lampowy wzmacniacz akustyczny 2x30 W	EP 4/2008	
Lampowy korektor dźwięku	EdW 7/2008	

Każdy transformator głośnikowy jest przystosowany do pracy z konkretną lampą. Aby dobrze go dopasować, najpierw należy prze-studiować wykresy charakterystyk. Na rys. 6 przedstawiono charakte-rystyki siatkowe lampy mocy, a na rys. 7 charakterystyki anodowe. Na ich podstawie musimy określić moc admissyjną, (czyli maksymalną moc, która może się wydzielać na anodzie lampy), optymalne ob-ciężenie anodowe oraz opór we-wnętrzny lampy. Na wykresie cha-rakterystyk anodowych znajdujemy krzywą oznaczającą 0 V na siatce sterującej. W miejscu maksymalnego prądu anodowego (w przypad-ku lampy 6H13C jest to 130 mA) zaznaczamy punkt A i kreślimy przez niego styczną do hiperboli mocy admissyjnej. Nachylenie tej prostej oznacza optymalne obciężenie. W dowolnym miejscu na prostej zaznaczamy drugi punkt B. Liczymy iloraz różnicowy:
 $R_a = \Delta U / \Delta I = (U_B - U_A) / (I_A - I_B)$ [Ω]
 R_a wynosi 2,5 kΩ, jednak literatura często podaje wartość 2 kΩ, którą przyjmujemy (jest bardziej korzyst-na). Ponieważ nasz stopień mocy pracuje przeciwsobnie, interesuje



Rys. 6. Charakterystyki siatkowe lampy mocy



Rys. 7. Charakterystyki anodowe lampy mocy

nas opór od jednej anody do drugiej:

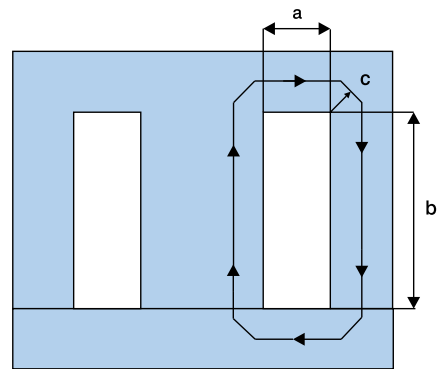
$$R_{aa} = 2 \cdot R_a = 4 [k\Omega]$$

Następnie na wykresie charakterystyk siatkowych również kreślimy tę samą prostą i zaznaczamy na niej punkt przecięcia z krzywą oznaczającą napięcie anodowe równe 200 V. Punkt P wyznacza nasz punkt pracy ($I_a = 65$ mA przy $U_p = -100$ V na siatce). Na charakterystyce siatkowej doskonale widać, w jakiej klasie będzie pracować lampa mocy. W naszym przypadku jest to klasa AB1. Na odpowiedniej charakterystyce anodowej odnajduje-

my nasz punkt P i kreślimy przez niego styczną do krzywej oznaczającej -100 V na siatce. Nachylenie tej prostej oznacza opór wewnętrzny lampy w naszym punkcie pracy. Zaznaczamy dowolny punkt na tej prostej i ponownie liczymy ilaraz różnicowy:

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{(U_Q - U_P)}{(I_Q - I_P)} [\Omega]$$

R_i wynosi około 550 Ω . Zakładamy dolną częstotliwość wzmacniacza (f_d), w prototypie wynosiła np. 16 Hz. Liczymy minimalną indukcyjność uzwojenia pierwotnego ze wzoru:



Rys. 8. Średnia długość strumienia magnetycznego

$$L_p = \frac{R_i \cdot R_{aa}}{R_i + R_{aa}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_d [H]$$

L_p wynosi około 5 H. Następnie należy obliczyć minimalną objętość rdzenia, który będzie spełniał nasze oczekiwania:

$$V_z = \frac{10^8 \cdot 0,8 \cdot \pi \cdot \mu_z \cdot \sqrt{P \cdot R_{aa}}}{(2 \cdot \pi \cdot f_d)^2 \cdot L_p \cdot B^2} [cm^3]$$

gdzie:

$P = 30\%$ - moc admisyjna dwóch triod łącznie = 0,326 [W] = 7,8 [W]

μ_z - średnia początkowa przenikalność rdzenia (przeważnie zakłada się 500)

B - maksymalna indukcja w rdzeniu w Gs (1 Tesla = 10000 Gausów)

Ponieważ materiał ferromagnetyczny z którego będzie wykonany rdzeń nie magnetyzuje się w sposób liniowy, duże indukcje w rdzeniu będą powodować powstawanie zniekształceń harmonicznyc. Dla wzmacniacza akustycznego możemy przyjąć $B = 2000$ Gs. Objętość rdzenia powinna wynosić około 100 cm^3 . W prototypie zastosowano kształtki EI84 (grubość pakietu 42 mm, grubość blachy 0,5 mm). Liczymy średnią długość strumienia magnetycznego w rdzeniu (rys. 8):

$$l_z = 2 \cdot (a + b) + 2 \cdot \pi \cdot c [cm]$$

a następnie przekrój czynny kolumny środkowej (10% zajmują tlenki i lakier na kształtkach)

$$s_z = 0,9 \cdot \frac{V_z}{l_z} [cm^2]$$

gdzie:

V_z - objętość rzeczywistego rdzenia (nie ta wychodząca z obliczeń)

Przechodzimy do uzwojeń. Liczymy liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego:

$$n_1 = 8920 \cdot \sqrt{\frac{L_p \cdot I_z}{0,9 \cdot \mu_z \cdot s_z}}$$

Przekładnia transformatora jest równa:

$$n = \sqrt{\frac{R_{głośnik}}{0,9 \cdot R_{aa}}}$$

Liczba zwojów uzwojenia wtórnego:

$$n_2 = n_1 \cdot n$$

Przekrój drutu uzwojenia pierwotnego jest zależny głównie od wartości skutecznej prądu. W uzwojeniu tym płynie prąd stały z nałożoną składową zmienną. Wartość skuteczną prądu w układzie przeciwnym oblicza się ze wzoru:

$$I_p = \sqrt{\frac{I_4^2 + (0,5 \cdot P)}{R_{aa}}} [A]$$

gdzie:

I_4 – prąd spoczynkowy tylko jednej triody (65 mA)

Przekrój drutu nawojowego uzwojenia pierwotnego:

$$s_p = \frac{I_p}{\Delta} [mm^2]$$

gdzie:

Δ to gęstość prądu od 2 do 2,5 A/mm²

Średnica drutu nawojowego uzwojenia pierwotnego:

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot s_p}{\pi}} [mm]$$

Przekrój drutu nawojowego uzwojenia wtórnego:

$$s_w = \frac{s_p}{n} [mm^2]$$

analogicznie średnica drutu nawojowego uzwojenia wtórnego:

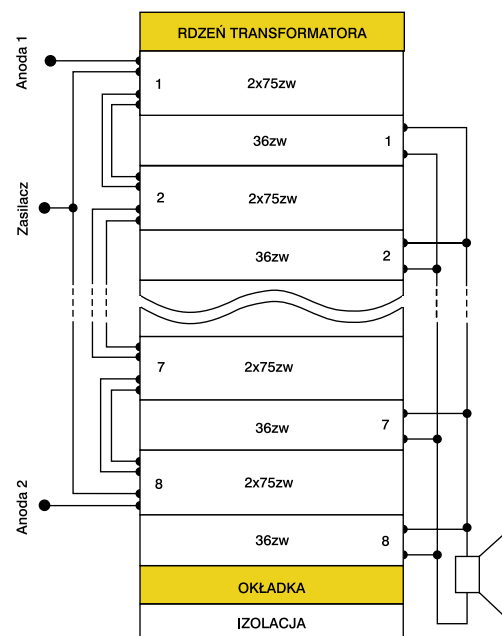
$$d_w = \sqrt{\frac{4 \cdot s_w}{\pi}} [mm]$$

Blaszki należy składać bardzo starannie i nie powinno się ich mocno ścisnąć. Nie można jednak dopuścić, aby swobodnie poruszały się, ponieważ transformator będzie „grał” głośniejsz niż głośnik. Żele poskładane lub zbyt mocno ściśnięte mogą spowodować zmniejszenie indukcyjności uzwojenia pierwotnego, co z kolei obetnie nam niskie tony. O ile to możliwe, należy stosować jak najcieńszą blachę. Im mniejsza grubość kształtki, tym mniejsze prądy wirowe i mniejsze straty w rdzeniu. Po obliczeniu transformatora należy oszacować, czy wszystkie zwoje zmieszczą się w oknie rdzenia przy konkretnym

karkasie. Na ile to możliwe, powinno stosować się grubszy drut nawojowy niż to wynika z obliczeń. Zmniejszy się wtedy oporność uzwojeń, przez co wzrośnie skuteczność całego transformatora. W trafach głośnikowych istnieją duże różnice potencjałów (np. pomiędzy uzwojeniem pierwotnym a wtórnym). Należy stosować druty z podwójną izolacją. Po pierwsze jest to zabezpieczenie przed przebiciami, po drugie grubsza izolacja zmniejsza pojemności międzyzwojowe.

Niestety nie wszystkie linie strumienia magnetycznego przenikają rdzeń. Niektóre niejako ulatują i nie biorą udziału w indukowaniu prądu elektrycznego. Takie zjawisko nazywamy indukcją rozproszoną. Wiąże się ono ze stratami w górnych partiach pasma. Dlatego w transformatorach akustycznych uzwojenia powinno się sekcjonować, czyli nawijać naprzemiennie warstwy uzwojenia pierwotnego i wtórnego. Sekcjonowanie nie tylko zmniejsza indukcyjność rozproszenia, izolacje pomiędzy sekcjami także wpływają na odporność elektryczną i zmniejszenie pojemności całkowitej. Najlepiej do izolowania warstw i sekcji w domowych warunkach nadaje się „pergaminy” papier do pieczenia. Pomiedzy dwoma sekcjami powinno się znaleźć od 4 do 6 warstw takiego papieru. Podczas nawijania warto pamiętać, że kawałki papieru lepiej ciąć o milimetr większe niż karkas – w ten sposób będziemy mieć pewność, że druty nie dotykają się na końcach warstw, a sam papier nie będzie się ślizgał.

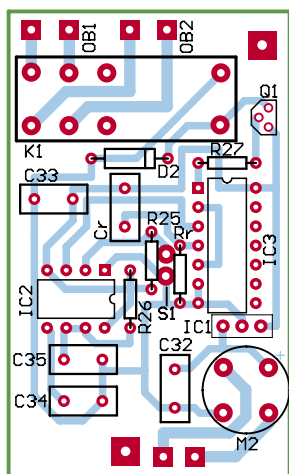
W transformatorach prototypowych nawinąłem 16 sekcji (8 uzwojenia pierwotnego i 8 wtórnego). Wszystkie sekcje uzwojenia pierwotnego łączy się szeregowo, natomiast sekcje uzwojenia wtórnego łączy się równolegle, tak jak to pokazano na **rys. 9**. Bardzo ważne jest, aby każda sekcja uzwojenia wtórnego miała dokładnie tyle samo zwojów. Jeśli warunek ten nie będzie spełniony, przez transformator będą przepływać prądy wyrównawcze i jego skuteczność spadnie. Transformatory dla układów Push-Pull można nawijać na dwa sposoby: albo podzielić karkas na



Rys. 9. Rozmieszczenie sekcji

dwa i nawijać dwa oddzielne bloki (zazwyczaj robi się tak w klasie B), albo nawijać bifilarnie, czyli dwoma drutami jednocześnie (jedynie uzwojenie pierwotne) – po zakończeniu nawijania koniec pierwszego drutu łączy się z początkiem drugiego (jest to odczep dla zasilacza), a dwa pozostałe końce łączy się z anodami lamp. Lepszym rozwiązaniem w naszym przypadku jest druga metoda, ponieważ stosując ją uzyskamy idealną symetrię. Transformator powinien być zabezpieczony przed uszkodzeniami mechanicznymi. Końce uzwojeń (odczepów) powinny być przyłutowane do twardszych kabli lub specjalnych zakończeń, jeśli takowe posiada karkas. W widocznym miejscu należy nakleić kartkę z informacjami o uzwojeniach, sekcjach i odczepach, a same uzwojenia należy mocno zakleić taśmą klejącą. Warto także zatopić na jakiś czas (ponad godzinę) cały transformator, nie tylko karkas z uzwojeniami, w Caponie. Zabezpieczy go to przed wilgocią, a także uniemożliwi blaszkom tzw. „granie” w trakcie pracy.

Mając nawijarkę nie warto oszczędzać na dławikach. Na dławik nadaje się rdzeń z każdego starego transformatora sieciowego, pod warunkiem, że jesteśmy w stanie rozebrać go nie niszcząc lakieru na kształtkach. Procedura liczenia dławików jest także możliwa, jednak do tego celu (i nie tylko) pan Wojciech Staszak stworzył



Rys. 10. Widok płytki włącznika

bardzo przydatny program ECCLab. Można go pobrać ze strony <http://www.ecclab.com>. Po uruchomieniu programu klikamy na „Elementy indukcyjne” i wybieramy „Dławik”. Nie jest wymagana znajomość wymiarów posiadanego rdzenia, ponieważ baza kształtek zawiera najczęściej stosowane wymiary. Program zapyta nas jedynie o niezbędne parametry i resztę obliczy sam.

Montaż i uruchomienie

Wzmacniacz najlepiej umieścić w aluminiowej obudowie. Blacha aluminiowa o grubości 1...2 mm łatwo się wygina i nawierca. Wszelkie ciężkie elementy, takie jak dławiki lub transformatory oraz płytki drukowane najlepiej jest przykręcić do płyty wiórowej. Przed malowaniem obudowy należy wygładzić powierzchnię papierem ściernym (≥ 200) i przemyć ją rozpuszczalnikiem. Drewniane boki wzmac-

niacza usztywniają konstrukcję. Do nich należy przykręcić gumowe nóżki lub takie, które będą dobrze tłumić drgania. Podstawki lamp muszą być dobrze dokręcone, aby lampy nie poruszały się w trakcie pracy – powoduje to tzw. mikrofonowanie. Przed uruchomieniem wzmacniacza należy sprawdzić każdy zasilacz oddzielnie. Przed każdą modyfikacją należy upewnić się, że kondensatory elektrolityczne są wystarczająco rozładowane. Środkowy odczep uzwojenia grzejnika ($2 \times 3,15$ V) należy przylutować do masy urządzenia (jest to tzw. symetryzacja względem masy) – zmniejszy to ewentualny brum. Wokół transformatorów sieciowych dobrze jest zastosować uziemione ekrany magnetyczne, co zniweluje sprzężenia magnetyczne transformatorów głośnikowych. Nie powinno się prowadzić kabli sieciowych blisko transformatorów głośnikowych, gdyż indukują one nieprzyjemny, słyszalny przydźwięk. Masy wszystkich stopni wzmacniacza powinny być połączone w jednym punkcie. Nie można dopuścić do powstania pętli masy, ponieważ mogą one wzbudzać wzmacniacz. Masę urządzenia warto uziemnić bezpośrednio lub przez rezystor 1 k Ω .

Urządzenia lampowe przeważnie montuje się na tzw. „pająka” i taki sposób jest zalecany w tym przypadku. Wyjątkiem jest układ wyłącznika, który jest wykonany w sposób tradycyjny na płytce z obwodem drukowanym (rys. 10). Pozwala to uniknąć sprzężeń i łapania zakłóceń z zewnątrz. Wszystkie elementy należy prowadzić równolegle, albo prostopadle do innych. Po upewnieniu się, że zasilacze pracują poprawnie należy kolejno wkładać lampy i sprawdzać napięcia i prądy w punktach kontrolnych. Poszczególne wartości przedstawione są w tab. 2. Na końcu układamy lampy mocy i regulujemy spoczynkowe prądy anodowe, których wartości możemy odczytać podpinając woltomierz w miejsca U9, U10. Jednoomowe rezystory nie mają na celu wprowadzenia ujemnego sprzężenia zwrotnego: prąd, który przez nie płynie jest wprost proporcjonalny do spadku napięcia na nich. Jeśli zastosujemy nieużywane lampy, przez około godzinę prądy te będą niestabilne. Prądy spoczynkowe

Tab. 2. Kontrolne wartości napięć i prądów		
Uk	+200 V	zależne od oporu dławika
Un	+360 V	zależne od oporu dławika
Up	-100 V	zależne od napięcia anodowego i punktu pracy
U1	+4 V	
U2	+125 V	
U3	+250 V	
U4	+65 V	
U5	+185 V	
U6	+300 V	
U7	+7,5 V	
U8	+200 V	
U9	65 mA	zależne od punktu pracy
U10	65 mA	zależne od punktu pracy
I1	3,7 mA	
I2	3,7 mA	
I3	5 mA	

Nowe stacje QUICK lutownicze

**SZYBKE NAGRZEWANIE
GRZAŁKA CERAMICZNA**



249 zł*

QUICK 236 230V/90W, 80°C+480°C, $\pm 2^\circ\text{C}$
Profesjonalna stacja lutownicza dedykowana do lutowania bezołowiowego

**BARDZO SZYBKE NAGRZEWANIE
GRZAŁKA ELEKTROMAGNETYCZNA
SZYBKO WYMIENNY GROT
Z SENSOREM**



349 zł*

QUICK 202D 230V/90W, 80°C+480°C, $\pm 2^\circ\text{C}$
Inteligentna stacja lutownicza dedykowana do lutowania bezołowiowego. Zasilanie grzałki 48V (400 KHz)

**OLBRZYMA MOC I WYDAJNOŚĆ
TRZY NASTAWIALNE PROGRAMY**



HOT - AIR

549 zł*

QUICK 861DS SMD (HOT-AIR), 230V/1000W, 100+500°C, 1-120 l/min
Profesjonalna stacja lutownicza z nadmuchem gorącego powietrza

* Wszystkie ceny netto, należy doliczyć 22% podatku VAT.

BIALL Sp. z o.o.

Otomin, ul. Słoneczna 43,
PL 80-174 Gdańsk
tel. +48 58 322 11 91, 92;
faks +48 58 322 11 93

e-mail: biall@biall.com.pl

Regionalne biura handlowe:

WARSZAWA, ul. Ratuszowa 11 p. 68
VOIP +48 22 211 13 03; kom. +48 505 107 957

e-mail: warszawa@biall.com.pl

JAWORZNO, ul. Nowowiejska 15

kom. +48 509 755 010; e-mail: jaworzno@biall.com.pl



www.biall.com.pl

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

R1: 1 M Ω /0,5 W
 R2: 51 k Ω /0,5 W
 R3: 33 k Ω /1 W
 R4: 1,1 k Ω /1 W
 R5, R6: 330 k Ω /0,5 W
 R7, R8: 18 k Ω /0,5 W
 R9: 6,8 k Ω /1 W
 R10, R11: 510 k Ω /0,5 W
 R12, R13: 22 k Ω /1 W
 R14: 3,9 k Ω /3 W
 R15: 750 Ω /0,5 W
 R16, R17: 120 k Ω /1 W
 R18, R19: 1 Ω /1 W
 R20: 47 Ω /1 W
 R21...R24: 470 k Ω /1 W
 R25, R28, R29: 10 k Ω /0,125 W
 R26: 220 k Ω /0,125 W
 R27: 1 k Ω /0,125 W
 R30: 47 k Ω /0,125 W
 Rx: 5...10 k Ω /1 W
 Rr: 100 k Ω /0,125 W
 Ra: dobrany doświadczalnie
 P1: potencjometr 2x100 k Ω B (logarytmiczny)
 P2...P5: rezystor nastawny 47 k Ω A (liniowy)

Kondensatory

C1: 10 μ F/400 V
 C2...C4, C6, C7, C11...C17, C20...C22: 100 nF/400 V
 C5, C8: 47 μ F/400 V
 C9, C10, C18, C19: 330 μ F/400 V
 C23, C24: 220 μ F/200 V
 C25...C27: 100 nF/200 V
 C28...C31: 330 nF/200 V
 C32, C37, C41: 220 μ F/50 V
 C33, C35, C36, C38, C40, C42, Cr: 10 μ F/16 V
 C34, C39: 10 nF/16 V

Półprzewodniki

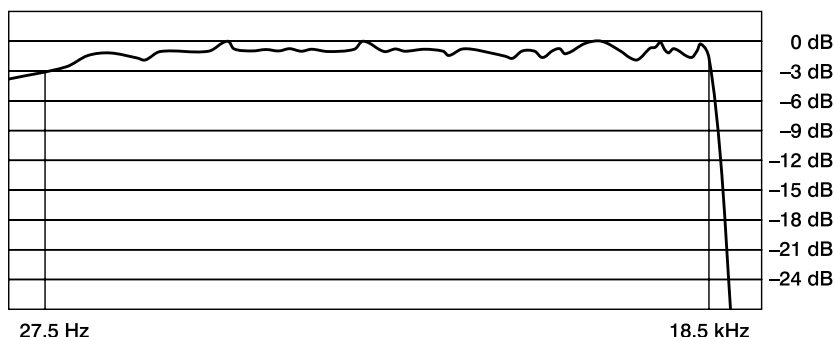
IC1, IC8: 7805
 IC2, IC9: NE555
 IC3: 4013
 IC4...IC7: 4026
 IC10: 7812
 M1: 1000 V/1 A
 M2: 100 V/1 A
 M3: 100 V/3 A
 D1: 1N4007
 D2, Da: 1N4148
 Q1: BC555
 W1...W4: SC52-11

Lampy

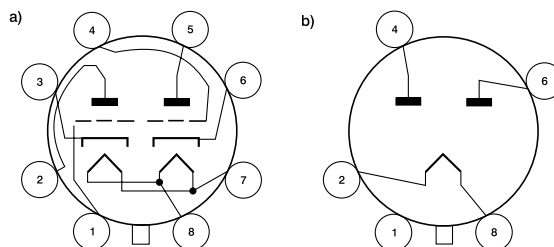
V1, V2: 6H8C
 V3: 6H13C
 V4: 5LJ3C

Inne

L1: 20 H
 L2, L3: 10 H
 T1: opis w tekście
 T2: opis w tekście
 T3: 6...12 V/100 mA
 T4: 12...15 V/2 A
 A1: 10...50 mA
 G1: opis w tekście
 S1, S2: styk zwirny
 K1: Przekątnik dla dwóch obwodów (cewka na 5 V)
 4 podstawki lampowe typu octal do chassis
 Podwójne gniazdo RCA
 Gniazda głośnikowe



Rys. 11. Wykres zmierzonego pasma prototypu



Rys. 12. Cokół lamp a) 6H13C i 6H8C, b) 5LJ3C

muszą być sobie równe, ponieważ nawet mała różnica (rzędu 1 mA) powoduje nasycanie się rdzenia transformatora głośnikowego i obcięcie basów.

Pomiary wzmacniacza

Z pewnością, jeśli ktoś włoży sporo serca i czasu w obliczenia i wykonanie wzmacniacza, będzie chciał sprawdzić, jak naprawdę przynosi on dźwięki. Przeważnie będzie nas interesowało jedynie pasmo. Okazuje się, że do takich pomiarów nie jest potrzebna skomplikowana aparatura. Wystarczy zwykły komputer i program Cool Edit PRO 2.0, który bez problemu można znaleźć w sieci. Po zainstalowaniu i włączeniu programu należy utworzyć nowy projekt. Próbkowanie 44 kHz przy rozdzielczości 16-bitowej w zupełności wystarczy. Następnie klikamy na „Generate”-> „Noise...”, zaznaczamy szum biały i wybieramy jego styl. Projekt zapisujemy jako plik WAV (nie MP3! – empetrójki obcinają pasmo nagrania, co jest efektem kompresji stratnej stosowanej do tworzenia pliku MP3) i ponownie tworzymy nowy projekt. Równolegle do głośnika (lub innego obciążenia na wyjściu wzmacniacza) podłączamy kabel „Jack”, który podpinamy do wejścia liniowego komputera. Na wejście wzmacniacza podajemy zapisany wcześniej szum biały. Nagrywamy sygnał, który komputer odbiera przez wejście liniowe. Mając próbkę klikamy na „Analyze”-> „Show Frequency Ana-

lysis”. Klikając „Scan” otrzymamy charakterystykę częstotliwościową naszego wzmacniacza. Pasma prototypu zostało przedstawione na rys. 11. Musimy pamiętać, że na wyjściu wzmacniacza napięcie jest większe niż to, do którego normalnie jest przystosowane wejście liniowe. Aby nie uszkodzić karty muzycznej należy zastosować odpowiedni dzielnik napięcia.

Uwagi końcowe

Jak widać, wykonanie lampowego wzmacniacza audio nie jest trudne i powinni poradzić sobie z nim nawet średnio zaawansowani amatorzy. Najtrudniejszym zadaniem jest wykonanie transformatora głośnikowego. W artykule pokazałem, że jest to możliwe nawet w warunkach domowych. Temat ten z uwagi na ograniczone miejsce w artykule nie został wyczerpany. Więcej można się dowiedzieć z internetowych artykułów, które można znaleźć pod poniższymi adresami:

- <http://www.fonar.com.pl/audio/projekty/teoria/traflag4/traflag1.htm>
- <http://www.fonar.com.pl/audio/projekty/teoria/traflag/traflag1.htm>
- <http://www.fonar.com.pl/audio/projekty/teoria/traflag3/traflag1.htm>
- http://www.fonar.com.pl/audio/projekty/trafa/trans2/trans_1.htm
- <http://www.fonar.com.pl/audio/projekty/teoria/traflag2/traflag1.htm>

a także z książki G.S. Cykina „Transformatory małej częstotliwości”

Tomasz Orłowski
sov@o2.pl