



### Podstawowe parametry:

- maksymalna moc wyjściowa: około 15 W,
- znamionowa impedancja obciążenia: 8  $\Omega$ ,
- jeden kanał (monoblok),
- wejście sygnału: asymetryczne,
- wykonany w całości na elementach dyskretnych, bez układów scalonych,
- stopień końcowy pracujący w klasie AB z wysokim prądem spoczynkowym (przeważa praca w klasie A),
- zasilacz transformatorowy ze stabilizacją napięcia,
- chłodzenie wyłącznie pasywne, za pomocą masywnych radiatorów.

### Dodatkowe materiały do pobrania ze strony [www.ulubionykiosk.pl/media](http://www.ulubionykiosk.pl/media)

AVT5836	Cyfrowy wzmacniacz mocy stereo z interfejsem I <sup>2</sup> S (EP 1/2021)	AVT1934	Miniatury wzmacniacz mocy 2x1 W/8 $\Omega$ (EP 9/2016)
AVT5756	Cyfrowy wzmacniacz mocy z interfejsem Bluetooth (EP 4/2020)	AVT1923	Końcówka o mocy 2x60...100 W (EP 8/2016)
AVT5717	Opóźniacz dotychczas głośników zasilany 230 V (EP 9/2019)	AVT5528	Wzmacniacz audio klasy D o mocy do 2x50 W (EP 2/2016)
AVT5669	Wzmacniacz mocy audio 4x48 W/4 $\Omega$ (EP 4/2019)	AVT5499	Zabezpieczenie głośników i słuchawek do urządzeń audio (EP 4/2015)
----	Wzmacniacz z kanałem basowym 2.1 (EP 1/2019)	AVT1843	PAmp_TDA7388 Wzmacniacz mocy audio 4x20 W/4 $\Omega$ (EP 2/2015)
AVT1982	Uniwersalny, stereofoniczny wzmacniacz mocy 2x10 W/8 V z regulacją barwy dźwięku (EP 2/2018)	AVT1833	Pamp_LM4766 – wzmacniacz mocy audio 2x20 W/8 $\Omega$ (EP 12/2014)
AVT1973	Miniatury, stereofoniczny wzmacniacz mocy (EP 10/2017)	AVT1758	Wzmacniacz z układem TPA3110 (EP 8/2013)
AVT5602	Stereofoniczny wzmacniacz klasy D o mocy 2x50 W (EP 8/2017)	AVT1746	Wzmacniacz o mocy 20 W z układem LM1875 (EP 7/2013)
AVT5547	4-kanałowy wzmacniacz mocy audio (EP 10/2016)	AVT5345	Wzmacniacz audio o mocy 2x300 W (EP 5/2012)

W ofercie AVT\*

**AVT5922**

\* Uwaga! Elektroniczne zestawy do samodzielnego montażu. Wymagana umiejętność lutowania! Podstawową wersją zestawu jest wersja [B] nazywana potocznie KIT-em (z ang. zestaw). Zestaw w wersji [B] zawiera elementy elektroniczne (w tym [UK] – jeśli występuje w projekcie), które należy samodzielnie wlutować w dołączoną płytkę drukowaną (PCB). Wykaz

elementów znajduje się w dokumentacji, która jest podlinkowana w opisie kitu. Mając na uwadze różne potrzeby naszych klientów, oferujemy dodatkowe wersje:  
 ■ wersja [C] – zmontowany, uruchomiony i przetestowany zestaw [B] (elementy wlutowane w płytkę PCB)  
 ■ wersja [A] – płytkę drukowaną bez elementów i dokumentacji

Kity, w których występuje układ scalony wymagający zaprogramowania, mają następujące dodatkowe wersje:  
 ■ wersja [A\*] – płytkę drukowaną [A] + zaprogramowany układ [UK] i dokumentacja  
 ■ wersja [UK] – zaprogramowany układ  
 Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik pdf! Podczas

składania zamówienia upewnić się, którą wersję zamawiasz – <http://sklep.avt.pl>.

W przypadku braku dostępności na stronie sklepu osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt Via e-mail: [kity@avt.pl](mailto:kity@avt.pl).



# Wzmacniacz audio dla wymagających (1)

*W dzisiejszych czasach prym w technice audio wiodą wzmacniacze „cyfrowe”, które mogą pochwalić się naprawdę imponującymi parametrami. Pomimo to, duża grupa fanów dobrego brzmienia zdecydowanie wybiera rozwiązania czysto analogowe, zaprojektowane i wykonane w taki sposób, jak odbywało się od kilkudziesięciu lat. Właśnie dla takich osób powstał opisany tu wzmacniacz.*

Sprzęt audio wysokiej jakości jest bardzo kosztowny – ceny takich urządzeń zaczynają się od kilkunastu...kilkudziesięciu tysięcy złotych. Zbudowane są z doskonałej jakości

elementów osadzonych w prawidłowo zaprojektowanym obwodzie i zamkniętych w solidnej, ułatwiającej eksploatację i cieszącej oko obudowie. Mówiąc krótko – wykonanie

bezkompromisowe. Na specjalne życzenie klienta mogą być dodane specjalne detale np. połączane gniazda lub elementy obudowy wykonane z drewna egzotycznego.

Zaprezentowany układ ma w sobie coś z takich konstrukcji: został zaprojektowany na bazie sprawdzonych, klasycznych rozwiązań wyłącznie z zastosowaniem elementów dyskretnych. Cechuje się prostotą działania i szerokimi możliwościami modyfikacji. Nie zawiera elementów uważanych za audiofilskie, lecz każdy może we własnym zakresie

odpowiednio podrasować tę konstrukcję. Co istotne, dwa moduły na płytach drukowanych – zasilacz i wzmacniacz mocy, zostały osadzone w obudowie, której wykonanie można zlecić. W artykule znajduje się jej szczegółowy projekt. W ten sposób możemy stać się posiadaczami sprzętu audio o wystarczającej, jak na domowe warunki, mocy wyjściowej, którego wygląd na pewno wzbogaci wystrój niejednego salonu albo pokoju odsłuchowego. Brak szumiących wentylatorów i solidna, metalowa obudowa mogą przywołać na myśl sprzęt produkowany kilka dekad temu.

Tytułowy wzmacniacz jest monoblokiem, czyli ma wejście monofoniczne oraz wyjście w postaci jednej pary zacisków głośnikowych. Chcącysterować dwie kolumny w układzie stereofonicznym, potrzebne będą dwa takie. Można też samodzielnie przeprojektować

obudowę (użyć większej), aby zmieściły się w niej dwa komplety płytek drukowanych z transformatorami sieciowymi. Możliwości jest naprawdę wiele!

### Budowa i działanie

Z uwagi na dużą złożoność projektu omówienie układu zostanie podzielone na trzy bloki:

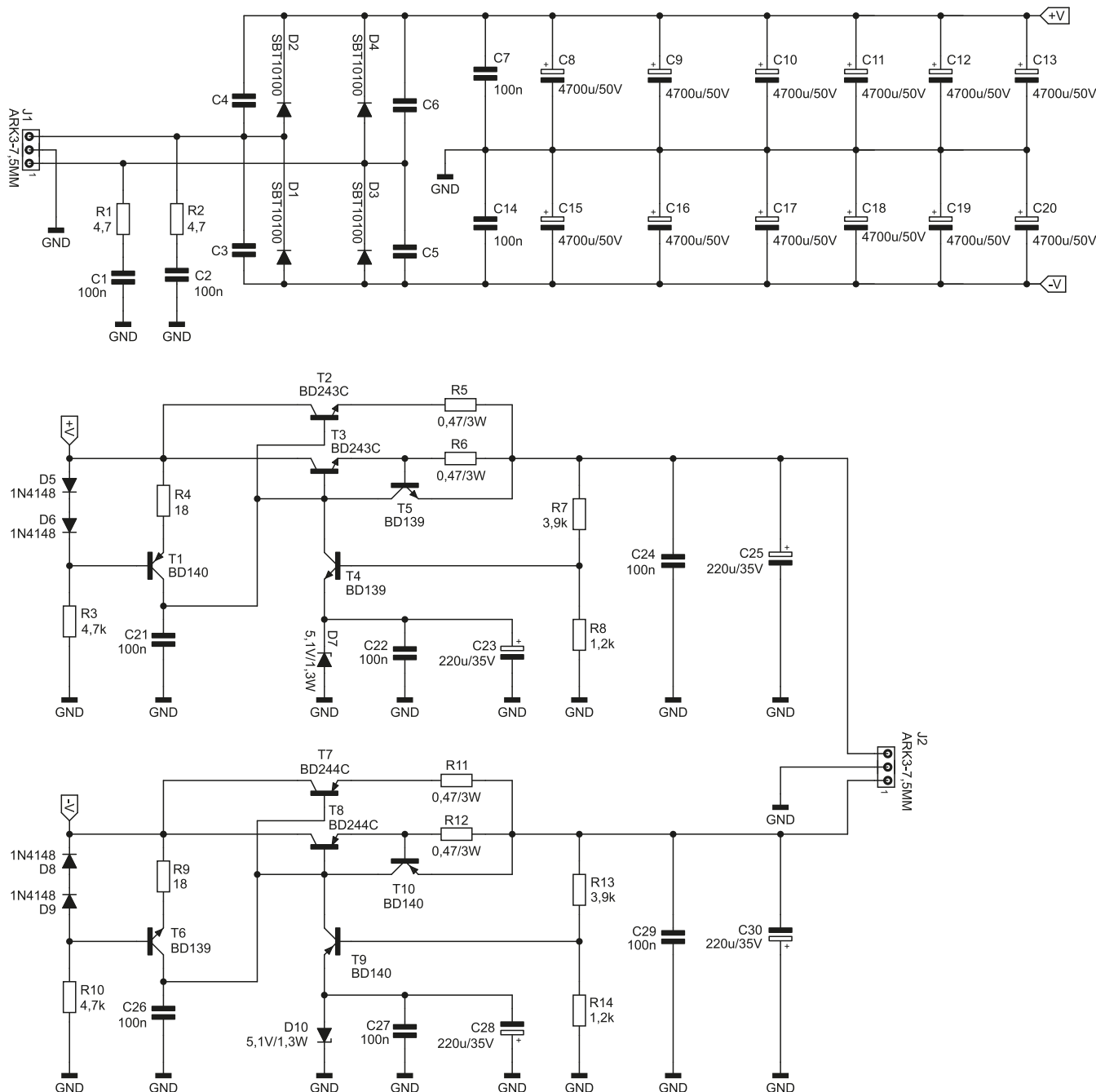
- zasilacz,
- wzmacniacz,
- konstrukcja łącząca wszystkie komponenty urządzenia, włączając w to elementy związane z obudową.

### Zasilacz

Schemat stabilizowanego zasilacza został pokazany na rysunku 1. Do zacisków złącza J1 jest podłączone dzielone uzwojenie wtórne transformatora sieciowego o napięciach

znamionowych 2×21 V AC. Dodatkowe obwody RC: R1+C1 i R2+C2 – tłumią zakłócenia o wysokiej częstotliwości, które mogłyby się przedostać z sieci przez transformator. Ich wpływ może być słyszalny w postaci cichego syczenia w głośniku o poziomie niezależnym odysterowania.

Cztery diody prostownicze D1...D4 tworzą mostek Graetz'a. Wybrano diody Schottky'ego ze względu na niski spadek napięcia w kierunku przewodzenia. Istnieje opinia, że diody Schottky'ego wprowadzają zakłócenia wywołane szybkim przełączaniem. Aby ten proces spowolnić, przewidziano na płycie miejsce dla kondensatorów C3...C6, które powinny mieć po kilka nanofaradów. Jednak w układzie prototypowym nie zaobserwowałem konieczności ich montażu, więc nie zostały ujęte w wykazie elementów.



Rysunek 1. Schemat ideowy modułu zasilacza

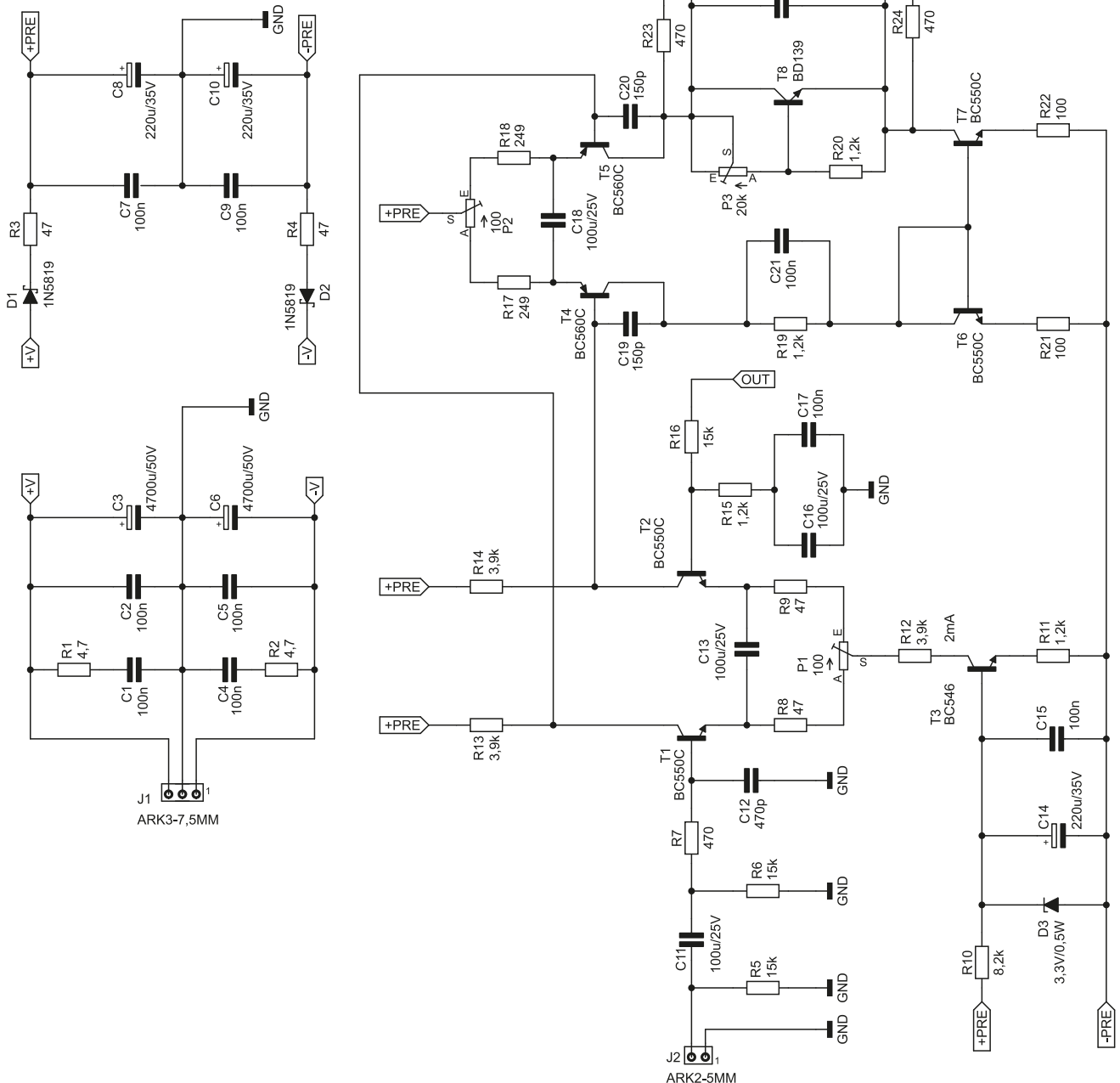
Wyprostowane, jednokierunkowe napięcie jest filtrowane przez potężną baterię dwunastu kondensatorów elektrolitycznych – po sześć na gałąź. Użycie wielu kondensatorów połączonych równolegle zmniejsza wypadkową wartość ESR oraz ESL, jak również rozkłada prąd tętnień pomiędzy kilka elementów. Dzięki temu będą mogły pracować przez bardzo długi czas bez pogorszenia parametrów.

Wzmacniacz został wyposażony w układ stabilizacji napięcia zasilającego. Stabilizator liniowy traci część mocy w postaci ciepła, za to redukuje amplitudę tętnień i znacząco zmniejsza wpływ napięcia sieciowego na położenie punktu pracy elementów wzmacniacza. Zastosowano układ z prostą pętlą sprzężenia zwrotnego dla stabilizacji napięcia wyjściowego.

Źródłem napięcia odniesienia jest dioda Zenera D7. Ponieważ diody Zenera mają tendencję do wytwarzania

szerokopasmowego szumu śrutowego, równolegle do niej podłączono kondensatory C22 i C23. Tę diodę polaryzuje źródło prądowe wykonane na tranzystorze T1, a natężenie dostarczanego prądu to niecałe 40 mA. Źródło prądowe ma wyższą rezystancję dynamiczną niż rezystor, co przekłada się na mniejszą amplitudę tętnień prądu

polaryzującego diodę D7. Dwie połączone szeregowo diody półprzewodnikowe, D5 i D6, wymuszają spadek napięcia na złączu baza-emiter tranzystora T1 i na rezystorze R4.



Rysunek 2. Schemat ideowy modułu wzmacniacza

**WYKAZ ELEMENTÓW**, które możesz zamówić w sklepie AVT na stronie sklep.avt.pl lub bezpośrednio (ul. Leszczyńska 11, 03-197 Warszawa, tel. 48222578451, e-mail: handlowy@avt.pl):

**Płytki zasilacza**

**Rezystory:** (THT o mocy 0,6 W i tolerancji 1%, jeżeli nie napisano inaczej)  
 R1, R2: 4,7 Ω  
 R3, R10: 4,7 kΩ  
 R4, R9: 18 Ω  
 R5, R6, R11, R12: 0,47 Ω 3 W  
 R7, R13: 3,9 kΩ (opis w tekście)  
 R8, R14: 1,2 kΩ

**Kondensatory:**

C1, C2, C7, C14, C21, C22, C24, C26, C27, C29: 100 nF/100 V raster 5 mm MKT  
 C3...C6: nie montować (opis w tekście)  
 C8...C20: 4700 µF/50 V raster 10 mm, średnica max. 22 mm  
 C23, C25, C28, C30: 220 µF/35 V raster 3,5 mm średnica 8 mm

**Półprzewodniki:**

D1...D4: SBT10100  
 D5, D6, D8, D9: 1N4148  
 D7, D10: dioda Zenera 5,1 V/1,3 W THT

**Pozostałe:**

J1, J2: ARK3/750  
 T1, T9, T10: BD140  
 T2, T3: BD243C lub odpowiednik  
 T4...T6: BD139  
 T7, T8: BD244C lub odpowiednik

**Płytki wzmacniacza**

**Rezystory:** (THT o mocy 0,6 W i tolerancji 1%, jeżeli nie napisano inaczej)  
 R1, R2: 4,7 Ω  
 R3, R4, R8, R9: 47 Ω  
 R5, R6, R16: 15 kΩ  
 R7, R23, R24: 470 Ω

R10: 8,2 kΩ  
 R11, R15, R19, R20: 1,2 kΩ  
 R12...R14: 3,9 kΩ  
 R17, R18: 249 Ω  
 R21, R22: 100 Ω  
 R25, R26: 0,22 Ω 3 W  
 R27: 10 Ω 3 W  
 P1, P2: 100 Ω montażowy, jednoobrotowy, leżący  
 P3: 20 kΩ montażowy helitrim 3296W

**Kondensatory:**

C1, C2, C4, C5, C7, C9, C15, C17, C21, C22, C24: 100 nF/100 V raster 5 mm MKT  
 C3, C6: 4700 µF/50 V raster 10 mm, średnica max. 22 mm  
 C8, C10, C14, C23: 220 µF/35 V raster 3,5 mm, średnica 8 mm  
 C11, C13, C16, C18: 100 µF/25 V raster 3,5 mm, średnica 8 mm bipolarny elektrolityczny np. ECEA1E101U Panasonic (opis w tekście)  
 C12: 470 pF 50 V ceramiczny COG raster 5 mm  
 C19, C20: 150 pF 50 V ceramiczny COG raster 5 mm

**Półprzewodniki:**

D1, D2: 1N5819  
 D3: dioda Zenera 3,3 V/0,5 W THT  
 D4...D7: dioda Zenera 12 V/0,5 W THT  
 T1, T2, T6, T7: BC550C (opis w tekście)  
 T3: BC546  
 T4, R5: BC560C  
 T8: BD139  
 T9: IRFP240  
 T10: IRFP9240

**Pozostałe:**

F1, F2: bezpieczniki szybkie F2A 5×20 mm + blaszki do druku (GN BEZP DRUK)  
 J1, J3: ARK3/750

J2: ARK2/500

**Pozostałe komponenty użyte do budowy wzmacniacza**

Obudowa MINI DISSIPANTE 2U – 1MNPDA02/33/300B  
 – panel 10mm – SREBRNY z frezowaniem i płytą montażową Mini PD 33/250 244×240 mm (opis w tekście)  
 Transformator 100 VA toroidalny 230 VAC 2×21 V 2×2,38 A (TST100 21V-21V) z mocowaniem  
 Gniazdo BNC przykręcane do obudowy (GNIAZD BNC4)  
 Gniazdo RCA przykręcane do obudowy (ACJD-RED)  
 Zaciski laboratoryjne: czerwony (3250-RT) i czarny (3250-SW)  
 Gniazdo zasilania IEC z bezpiecznikiem, przykręcane (GN ZAS.6200)  
 Bezpiecznik zwłoczny T2A 5×20 mm  
 Oprawka diody LED 5 mm (LED OPRAW 11)  
 Dioda LED czerwona 5 mm (L-53HD)  
 Rezystor 6,8 kΩ 0,6 W do diody LED  
 Przetłącznik ON-OFF dźwigniowy (KN3D-101)  
 Gałka na oś 6 mm (GAŁ RN-113A)  
 Potencjometr ALPS 2×10 kΩ logarytmiczny RK271  
 Płytki do podłączenia potencjometru RK271 (opis w tekście)  
 Przewód ekranowany 1-żyłowy  
 Przewody 2,5 mm<sup>2</sup>, 1,5 mm<sup>2</sup> i 0,22 mm<sup>2</sup> (szczegóły w tekście)  
 5 podkładek silikonowych TO220  
 2 podkładyki silikonowe TO247  
 4 tulejki izolacyjne TO220  
 10 tulejek dystansowych 8 mm, gwint wew/zew, poliamid  
 4 śrubki M2,5 5 mm (do złącza BNC)  
 Oczko lutownicze M3  
 Śrubki M3 i nakrętki  
 Opaski zaciskowe z tworzywa sztucznego  
 Klej termoprzewodzący  
 Pasta termoprzewodząca

Rezystor R4 polaryzuje bazę T1 oraz wspomagane diody.

Równolegle połączone tranzystory T2 i T3 pełnią funkcję elementów wykonawczych, przez które przepływa prąd wyjściowy zasilacza. Rezystory R5 i R6 wyrównują rozpiętość prądów między nimi poprzez zmniejszenie wpływu napięcia baza-emiter na natężenie prądu danego tranzystora. W trakcie prawidłowej pracy przez każdy z nich przepływa prąd o natężeniu około 300 mA, co wywołuje spadek napięcia rzędu 150 mV. Tranzystor T5 monitoruje spadek napięcia na jednym z tych rezystorów, ściślej na R6. Jeżeli ten spadek byłby na tyle silny, że otworzyłby złącze baza-emiter tego tranzystora, to zabierze on, przez kolektor do wyjścia zasilacza, część prądu przeznaczoną dla T2 i T3. Prąd wyjściowy zostanie w bardzo prosty sposób zredukowany.

Jeszcze jedną gałęzią, która wchodzi do węzła zasilanego przez kolektor T1, jest kolektor tranzystora T4. Pełni funkcję prostego wzmacniacza błędów. Jego bazę polaryzuje dzielnik składający się z rezystorów R8 i R9. W trakcie prawidłowej pracy na R8 występuje spadek napięcia równy sumie napięć: przewodzącej diody D7 (5,1 V) oraz otwartego złącza baza-emiter tranzystora T4 (0,7 V). Na R7 będzie się odkładało napięcie proporcjonalnie większe, dokładniej 18,9 V. Zatem napięcie wyjściowe układu musi wynosić 5,8 V+18,9 V=24,7 V. Jeżeli miałyby wzrosnąć, prąd kolektora T4 również wzrosnie, przez co zabierze nieco prądu z baz T2 i T3, obniżając napięcie wyjściowe. I w drugą stronę: jego spadek poniżej tej granicy skutkuje zmniejszeniem napięcia baza-emiter T4, przez co większa część prądu ze źródła prądowego popłynie do baz T2 i T3.

Zaprojektowany w ten sposób zasilacz nie zapewnia rewelacyjnych parametrów (jak na dzisiejsze realia). Współczynnik stabilizacji można byłoby znacznie poprawić, stosując wzmacniacz błędów o wyższym wzmocnieniu, a najlepiej scalony stabilizator. Dalszym etapem byłoby już tylko użycie stabilizatora impulsowego. To prawda, lecz celem tego projektu było zbudowanie w pełni funkcjonalnego wzmacniacza złożonego z prostych elementów dyskretnych, takich jak diody i tranzystory. Obwód stabilizujący napięcie dodatkowo został szczegółowo omówiony. Stabilizator napięcia ujemnego ma identyczną topologię, różni się kierunkami prądów i komplementarnymi typami elementów. Zasada działania jest identyczna. Oba napięcia – dodatnie i ujemne – są dostępne na zaciskach złącza J2.

**Wzmacniacz**

Schemat bloku wzmacniacza został pokazany na **rysunku 2**. Napięcie wyjściowe zasilacza trafia na zaciski złącza J1. Jest ono filtrowane z zakłóceń wysokoczęstotliwościowych, a dodatkowo kondensatory C3 i C6 redukują impedancję wyjściową takiego źródła zasilania. Dla obwodów stopnia wejściowego i stopnia sterującego zastosowano elementy filtrujące. Diody D1 i D2 doładowują kondensatory C7...C10, co zmniejsza wpływ tętnień napięcia na kondensatorach C3 i C6. Rezystory R3 i R4 spowalniają doładowywanie kondensatorów, zmniejszając tętnienia odkładającego się na nich napięcia.

Wejściowy sygnał audio jest podawany na zaciski złącza J2. Rezystor R5 stanowi obciążenie źródła sygnału – zmniejsza impedancję

wejściową, co wpływa także na ograniczenie zakłóceń. Stanowi on również element polaryzujący kondensator C11, którego zadaniem jest odcięcie ewentualnej składowej stałej pochodzącej ze źródła sygnału, która zmieniałaby punkt pracy układu wejściowego. Rezystor R6 polaryzuje z kolei drugą elektrodę C11 oraz stanowi drogę dla prądu stałego zasilającego bazę T1. Kondensator C11 jest elektrolitycznym kondensatorem bipolarnym, wobec czego wystąpienie niewielkiej składowej stałej o dowolnej polaryzacji nie uszkodzi go.

Rezystor R7 i kondensator C12 tworzą prosty filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej około 720 kHz. Tak wysoka wartość nie ma wpływu na charakterystykę amplitudową w paśmie słyszalnym, nie spowalnia również znacząco odpowiedzi impulsowej, lecz za to zawęża pasmo dla szumu i zakłóceń.

Pierwszym stopniem wzmacniającym jest układ różnicowy zrealizowany na tranzystorach T1 i T2. Są to niskoszumowe tranzystory dyskretnie. Ewentualną rozbieżność w napięciach baza-emiter można skorygować, regulując potencjometrem P1. Jego obecność zmniejsza wzmocnienie tego stopnia, wobec czego ich emitory zostały sprzęgnięte (dla składowej zmiennej) za pomocą kondensatora C13. Tranzystor T1 otrzymuje na bazę sygnał audio, zaś T2 – sygnał sprzężenia zwrotnego wraz ze składową stałą, co zostanie wyjaśnione w dalszej części.

Źródło prądowe zasilające emitory pary różnicowej T1+T2 zostało zrealizowane w bardzo prosty sposób – przy użyciu tranzystora T3, którego baza jest polaryzowana stałym napięciem wymuszonym przez diodę Zenera. Spadek napięcia na R11, który wynosi około 2,4 V, wymusza przepływ prądu emitera równy 2 mA. Dioda



Zenera jest połączona równolegle z kondensatorami, aby generowany przez nią szum nie powodował fluktuacji prądu emiterów pary różnicowej. Rezystor R10 polaryzuje diodę D3 z potencjału +PRE, a nie z masy, aby spadek napięcia na nim był możliwie największy – wówczas najlepiej odzwierciedla pracę źródła prądowego – oraz aby symetrycznie obciążać, źródło zasilania. Rezystor R12 nie jest, w teorii, potrzebny, lecz zmniejsza wpływ pojemności Cjc tranzystora T3 na pracę układu różnicowego T1+T2.

Obciążeniem kolektorów układu różnicowego T1+T2 są rezystory o jednakowej wartości, R13 i R14. Spadek napięcia na nich wynosi około  $1 \text{ mA} \times 3,9 \text{ k}\Omega = 3,9 \text{ V}$ . Wyjście układu różnicowego jest w pełni symetryczne, co ułatwia realizację następnego stopnia układu. Zadbano o niski prąd pracy tranzystorów w pierwszym stopniu układu, ponieważ ma on decydujący wpływ na poziom szumów, a ten z kolei rośnie wraz ze wzrostem natężenia prądu kolektorów.

Spadki napięć na R13 i R14 ustalają prąd emiterów tranzystorów T4 i T5, które również tworzą układ różnicowy. Płynie przez nie niemalże prąd, ponieważ w emiterze każdego z tych tranzystorów znajduje się rezystancja  $249 \Omega + 100 \Omega / 2 \approx 300 \Omega$ . Ich bazy są na potencjale o około  $3,9 \text{ V}$  niższym od potencjału węzła +PRE, zatem prądy emiterów wynoszą około  $(3,9 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) / 300 \Omega \approx 10,7 \text{ mA}$ . Potencjometr P2 pozwala uzyskać symetrię między nimi, ponieważ to również są tranzystory dyskretne. Tak duży prąd tego stopnia ma pozytywny wpływ na szybkość przeładowywania pojemności wejściowych tranzystorów MOSFET.

Kondensatory C19 i C20 zawężają pasmo przenoszenia. Ich wartość została dobrana doświadczalnie, zaś obecność tych elementów jest kluczowa dla stabilnej pracy układu. Zdecydowano się na taki krok zamiast np. spowolnienia przeładowywania pojemności wejściowych tranzystorów MOSFET, ponieważ nie wprowadza on do sygnału zniekształceń. Jak pokażą pomiary, pasmo przenoszenia tego wzmacniacza i parametry jego odpowiedzi czasowej są i tak imponujące jak na relatywnie prosty układ audio.

Obciążeniem kolektorów układu różnicowego T4+T5 jest lustro prądowe. Daje to dwukrotny wzrost wzmocnienia w stosunku do obciążenia rezystancyjnego. Rezystory R21 i R22 wyrównują różnice w napięciach baza-emiter tych tranzystorów. Rezystor R19 zmniejsza straty mocy w tranzystorach i wyrównuje je w stosunku do sąsiedniej gałęzi. Kondensator C21 przyspiesza sterowanie tranzystorem T6 (połączonym w diodę) przez T4.

W sąsiedniej gałęzi, znajdującej się między kolektorami tranzystorów T5 i T7, znajduje się obwód znany jako „mnożnik napięcia baza-emiter”. Napięcie na zaciskach rezystora R20

jest równe napięciu baza-emiter tranzystora T8, zaś na potencjometrze P3 jest proporcjonalnie większe, ponieważ prąd płynący przez P3 i R20 jest w przybliżeniu taki sam. To powoduje, że T8 staje się diodą, której napięcie przewodzenia można wyregulować oraz zmienia się ono wraz z temperaturą jego złącza baza-emiter. Przykręcając T8 do radiatora chłodzącego tranzystory mocy można ustabilizować ich punkt pracy. Kondensatory C22 i C23 zmniejszają impedancję tego „mnożnika”, czym poprawiają sprzężenie zmiennoprądowe między bramkami tranzystorów mocy. Tranzystor T8 (BD139) jest relatywnie wolny, ale on nie przenosi sygnału – czynią to kondensatory C22 i C23. Natomiast jego obudowa ułatwia przykręcenie go do radiatora chłodzącego tranzystory wyjściowe i to był kluczowy powód wyboru takiego, a nie innego, elementu.

W roli stopnia wyjściowego pracują dwa tranzystory MOSFET o przeciwnych polaryzacjach. Są połączone w układzie wtórnika komplementarnego. Mają zbliżony kształt charakterystyk przejściowych, podobną transkonduktancję w tym samym punkcie pracy i podobne napięcie progowe. Para IRFP240 i IRFP9240 jest często spotykana we wzmacniaczach akustycznych.

Diody Zenera D4 i D5 oraz D6 i D7 zabezpieczają izolator podbramkowy tych tranzystorów przed przebicciem wywołanym chwilowym przekroczeniem dopuszczalnego napięcia bramka-źródło. Rezystory R23 i R24 poprawiają stabilność pracy układu, ponieważ, wraz z pojemnościami wejściowymi tych tranzystorów, tworzą filtry dolnoprzepustowe. Na rezystorach R25 i R26 odkłada się napięcie wywołane przez prąd spoczynkowy, co pozwala wyrównać napięcia bramka-źródło między tymi tranzystorami. Bezpieczniki F1 i F2 tworzą proste zabezpieczenie przeciwprzeciążeniowe dla tranzystorów mocy. Rezystor R27 i kondensator C24 tworzą tzw. obwód Zobla, który wyrównuje impedancję widzianą przez tranzystory wyjściowe w funkcji częstotliwości – kolumny

głośnikowe, z racji indukcyjnego charakteru, zwiększając swoją impedancję wraz ze wzrostem częstotliwości.

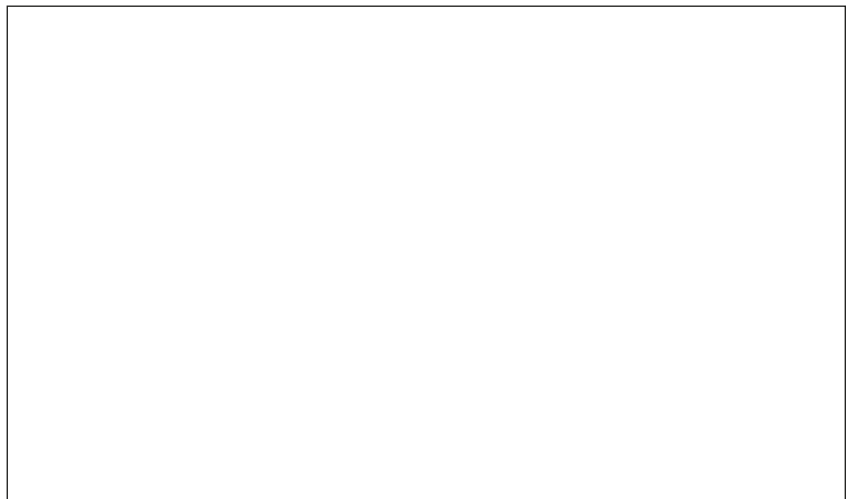
Ostatnim elementem składowym bloku wzmacniacza jest sprzężenie zwrotne, zarówno dla składowej stałej, jak i zmiennej. Sprzężenie stałoprądowe realizuje rezystor R16, który ma rezystancję zbliżoną do tej, która polaryzuje bazę T1. W ten sposób nie powstaje składowa różnicowa, którą wywołują prądy baz T1 i T2 na rezystancjach je polaryzujących.

Dla składowej zmiennej uaktywnia się dzielnik rezystorowy, składający się z R15 i R16, który ustala finalne wzmocnienie układu dla składowej zmiennej. Na zaciskach kondensatorów C16 i C17 występuje zerowa składowa stała, zatem i w tym miejscu użyto bezbiegunowego kondensatora elektrolitycznego o znacznej pojemności. Dla zmniejszenia jego impedancji w zakresie wysokich częstotliwości połączono go równolegle z kondensatorem foliowym.

Warto zauważyć, że prądy płynące przez elementy tego układu nie zależą od dokładnej wartości napięcia zasilającego. Dzieje się tak dzięki źródłom i lustrum prądowym, a także różnicowemu wzmacniaczowi błędu dla składowej stałej (para różnicowa T1+T2), który ustala zerową składową na wyjściu, biorąc jako referencję potencjał masy. Jedynie prąd rezystora R10 może ulegać wahaniom przy zmianach wartości napięć zasilających, ale ma on drugorzędne znaczenie.

Potencjometr P3 ustala punkt pracy tranzystorów mocy, a dokładniej ich prąd spoczynkowy. Jednak napięcie progowe tranzystorów połowych ulega zmianie wraz z temperaturą, a dokładniej – rośnie, co wymaga zwiększenia napięcia bramka-źródło dla utrzymania tego samego prądu drenu. Dlatego prąd ustalony przy zimnych tranzystorach stanie się znacznie niższy, gdy te się rozgrzeją. Obwód z tranzystorem T8 ma za zadanie częściowo to kompensować, ponieważ napięcie przewodzenia złącza p-n rośnie wraz z temperaturą. Po zwielokrotnieniu,

REKLAMA



za pomocą dzielnika P3+R20, napięcie kolektor-emiter T8 również będzie rosło wraz z temperaturą.

Tranzystory polowe wykazują ujemne termiczne sprzężenie zwrotne (prąd drenu spada wraz ze wzrostem temperatury przy stałym napięciu bramka-źródło), a bipolarnie dodatnie (prąd kolektora rośnie wraz ze wzrostem temperatury przy stałym napięciu baza-emiter), więc te dwa przeciwstawne efekty powinny się skompensować. Ten mechanizm nie działa idealnie – przeważa ujemne sprzężenie zwrotne pochodzące od tranzystorów MOSFET. Ale, jak pokażą pomiary, będzie to oddziaływanie dostatecznie silne, aby utrzymać punkt pracy w rozsądnych granicach.

**Całe urządzenie**

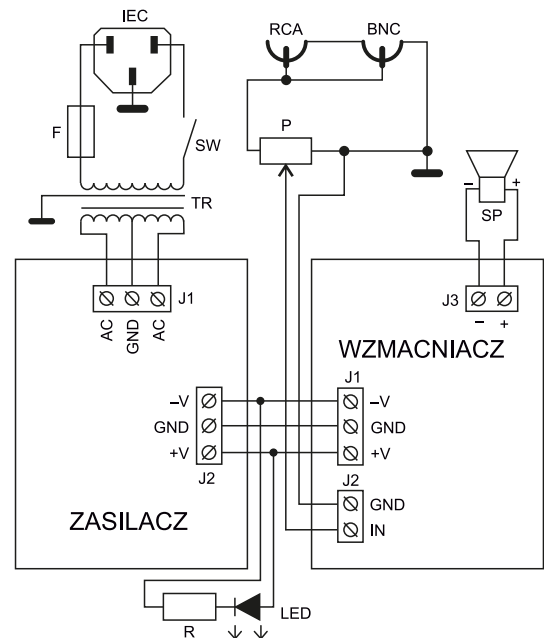
Schemat ideowo-blokowy znajduje się na rysunku 3. Ten rysunek przyda się podczas omawiania montażu urządzenia w obudowie. Jako zabezpieczenie toroidalnego transformatora sieciowego TR powinien wystąpić bezpiecznik zwolczony, w układzie modelowym użyto bezpiecznika T2A. Gniazdo IEC może być zintegrowane z oprawką bezpiecznika.

Dwie płytki drukowane – zasilacza i wzmacniacza – powinny być połączone między sobą trzema przewodami o znacznym polu przekroju poprzecznego. Ich rozdzielenie ułatwiło przykręcenie wszystkich tranzystorów wymagających chłodzenia do radiatorów, o czym dalej. Prąd diody LED sygnalizującej załączenie wzmacniacza jest ograniczany przy użyciu rezystora R, a cała ta gałąź pobiera zasilanie pomiędzy zacisków V+ i V- zasilacza dla symetrycznego obciążenia go.

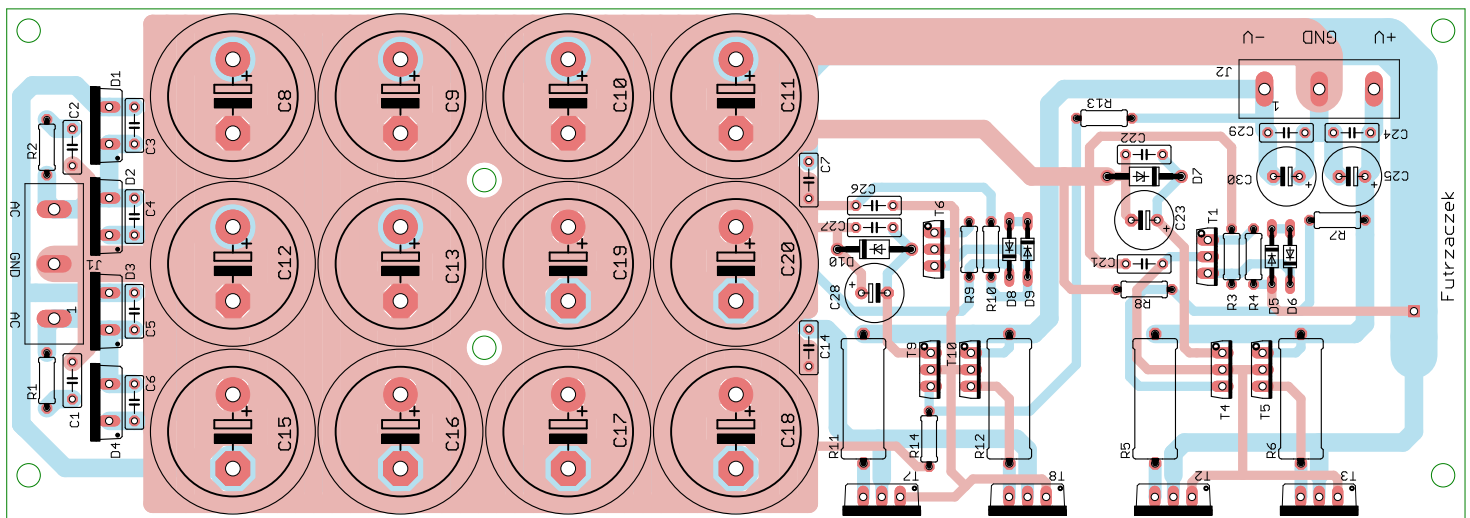
**Montaż**

Płytką zasilacza ma wymiary 70×200 mm, natomiast płytką wzmacniacza jest mniejsza – 70×140 mm. Obie płytki drukowane mają dwie warstwy przewodzące. Ich wzór ścieżek oraz schematy montażowe zostały pokazane na rysunkach 4 i 5. W odległości 3 mm od krawędzi płytek znalazły się otwory montażowe, każdy o średnicy

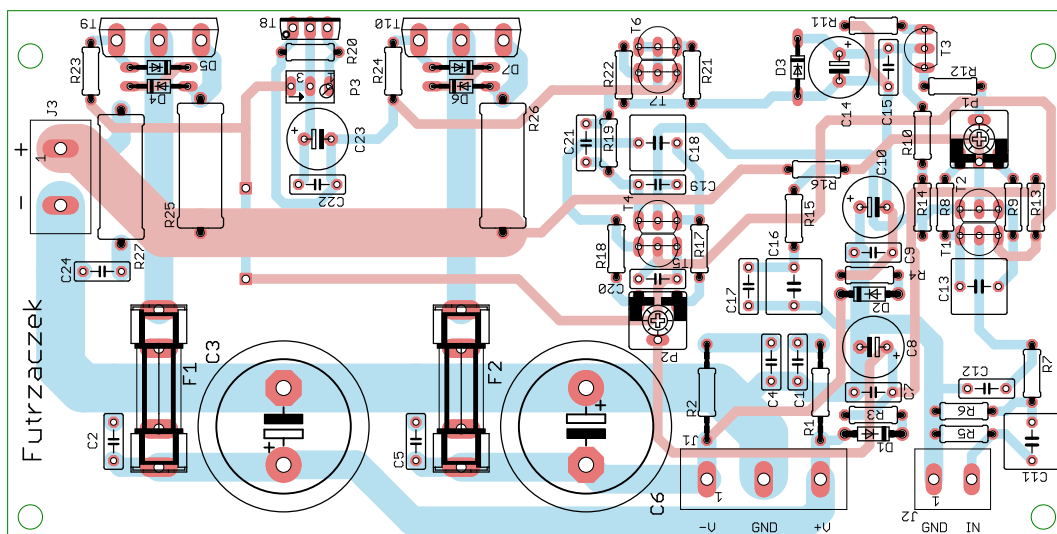
3,2 mm, zaś otwory przy radiatorach są odsunięte od tych krawędzi o 6 mm z uwagi na obecność metalowych elementów konstrukcyjnych



Rysunek 3. Schemat ideowo-blokowy kompletnej konstrukcji



Rysunek 4. Schemat płytki PCB modułu zasilacza



Rysunek 5. Schemat płytki PCB modułu wzmacniacza





Fotografia 1. Wygląd zmontowanej płytki zasilacza

obudowy. Płytkę zasilacza ma dwa dodatkowe otwory znajdujące się pomiędzy kondensatorami elektrolitycznymi, które są stosunkowo ciężkie. Długi laminat mógłby się wyginać, a dodając co najmniej jeden punkt podparcia, można temu zapobiec.

Na obu płytkach znajdują się wyłącznie elementy montowane techniką przewlekana, więc do ich polutowania wystarczy zwykła lutownica, niezbyt grube spoiwo lutownicze (tinol), kalafonia i trochę cierpliwości. Na tym etapie nie należy montować tranzystorów przykręcanych do radiatorów, czyli:

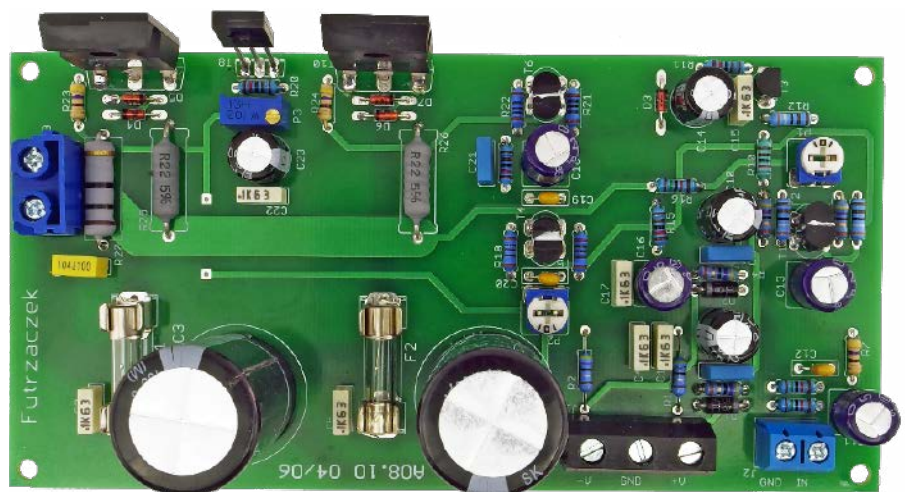
- T2, T3, T7 i T8 na płytce zasilacza,
- T8, T9 i T10 na płytce wzmacniacza.

Szczegółowy widok obu tych płytek po zmontowaniu (już z tranzystorami) został pokazany na **fotografiach 1 i 2**. Tranzystory zostaną przylutowane do płytek po zamontowaniu ich w obudowie, o czym dalej. W ten sposób będzie można idealnie dobrać długość ich wyprowadzeń.

Tranzystory T1 i T2, T4 i T5 oraz T6 i T7 powinny pracować w możliwie zbliżonych warunkach termicznych. Zostały na płytce umiejscowione w taki sposób, aby dało się skleić ze sobą ich płaskie fragmenty obudów. Odrobina kleju termoprzewodzącego, nałożonego na odtłuszczone powierzchnie, oraz ściśnięcie ze sobą szczypcami załatwi sprawę. Na fotografii 2 są widoczne na tranzystorach białe ślady tego kleju, którego nadmiar wyciekł pomiędzy obudów. Można również te tranzystory skleić przed wlutowaniem w płytkę.

Wygląd wewnętrznej konstrukcji wzmacniacza został pokazany na **fotografii 3**. Dokładny opis przygotowania obudowy oraz przebieg procesu uruchamiania wzmacniacza zostanie opisywany w kolejnej części artykułu.

**Michał Kurzela, EP**



Fotografia 2. Wygląd zmontowanej płytki wzmacniacza



Fotografia 3. Wygląd wewnętrznej konstrukcji wzmacniacza



### Podstawowe parametry:

- maksymalna moc wyjściowa: około 15 W,
- znamionowa impedancja obciążenia: 8  $\Omega$ ,
- jeden kanał (monoblok),
- wejście sygnału: asymetryczne,
- wykonany w całości na elementach dyskretnych, bez układów scalonych,
- stopień końcowy pracujący w klasie AB z wysokim prądem spoczynkowym (przeważa praca w klasie A),
- zasilacz transformatorowy ze stabilizacją napięcia,
- chłodzenie wyłącznie pasywne, za pomocą maszynowych radiatorów.

### Dodatkowe materiały do pobrania ze strony [www.ulubionykiosk.pl/media](http://www.ulubionykiosk.pl/media)

AVT5836	Cyfrowy wzmacniacz mocy stereo z interfejsem I <sup>2</sup> S (EP 1/2021)	AVT1934	Miniatury wzmacniacz mocy 2x1 W/8 $\Omega$ (EP 9/2016)
AVT5756	Cyfrowy wzmacniacz mocy z interfejsem Bluetooth (EP 4/2020)	AVT1923	Końcówka o mocy 2x60...100 W (EP 8/2016)
AVT5717	Opóźniacz dotychczas głośników zasilany 230 V (EP 9/2019)	AVT5528	Wzmacniacz audio klasy D o mocy do 2x50 W (EP 2/2016)
AVT5669	Wzmacniacz mocy audio 4x48 W/4 $\Omega$ (EP 4/2019)	AVT5499	Zabezpieczenie głośników i słuchawek do urządzeń audio (EP 4/2015)
----	Wzmacniacz z kanałem basowym 2.1 (EP 1/2019)	AVT1843	PAmp_TDA7388 Wzmacniacz mocy audio 4x20 W/4 $\Omega$ (EP 2/2015)
AVT1982	Uniwersalny, stereofoniczny wzmacniacz mocy 2x10 W/8 V z regulacją barwy dźwięku (EP 2/2018)	AVT1833	Pamp_LM4766 – wzmacniacz mocy audio 2x20 W/8 $\Omega$ (EP 12/2014)
AVT1973	Miniatury, stereofoniczny wzmacniacz mocy (EP 10/2017)	AVT1758	Wzmacniacz z układem TPA3110 (EP 8/2013)
AVT5602	Stereofoniczny wzmacniacz klasy D o mocy 2x50 W (EP 8/2017)	AVT1746	Wzmacniacz o mocy 20 W z układem LM1875 (EP 7/2013)
AVT5547	4-kanałowy wzmacniacz mocy audio (EP 10/2016)	AVT5345	Wzmacniacz audio o mocy 2x300 W (EP 5/2012)

W ofercie AVT\*

## AVT5922

\* Uwaga! Elektroniczne zestawy do samodzielnego montażu. Wymagana umiejętność lutowania! Podstawową wersją zestawu jest wersja [B] nazywana potocznie KIT-em (z ang. zestaw). Zestaw w wersji [B] zawiera elementy elektroniczne (w tym [UK] – jeśli występuje w projekcie), które należy samodzielnie wzlutować w dołączoną płytkę drukowaną (PCB). Wykaz

elementów znajduje się w dokumentacji, która jest podlinkowana w opisie kitu. Mając na uwadze różne potrzeby naszych klientów, oferujemy dodatkowe wersje:  
 • wersja [C] – zmontowany, uruchomiony i przetestowany zestaw [B] (elementy wzlutowane w płytkę PCB)  
 • wersja [A] – płytkę drukowaną bez elementów i dokumentacji

Kity, w których występuje układ scalony wymagający zaprogramowania, mają następujące dodatkowe wersje:  
 • wersja [A\*] – płytkę drukowaną [A] + zaprogramowany układ [UK] i dokumentacja  
 • wersja [UK] – zaprogramowany układ  
 Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik pdf! Podczas

składania zamówienia upewnij się, którą wersję zamawiasz – <http://sklep.avt.pl>.

W przypadku braku dostępności na stronie sklepu osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt Via e-mail: [kity@avt.pl](mailto:kity@avt.pl).



# Wzmacniacz audio dla wymagających (2)

W dzisiejszych czasach prym w technice audio wiodą wzmacniacze „cyfrowe”, które mogą pochwalić się naprawdę imponującymi parametrami. Pomimo tego, duża grupa fanów dobrego brzmienia zdecydowanie wybiera rozwiązania czysto analogowe, zaprojektowane i wykonane w taki sposób, jak odbywało się od kilkudziesięciu lat. Druga część artykułu zawiera opis montażu i przygotowania obudowy wzmacniacza oraz opisuje proces pierwszego uruchomienia gotowej konstrukcji.

## Obudowa

Układ modelowy został zmontowany w obudowie MINI DISSIPANTE 2U o symbolu 1MNPDA02/33/300B, która została

zakupiona w firmie EX-OR modushop.pl z Wrocławia. Przedni panel jest wykonany z płyty aluminiowej o grubości 10 mm w kolorze naturalnym (srebrnym), jest on anodowany

dla zabezpieczenia przed brudzeniem. Do obudowy została dokupiona płyta montażowa, Mini PD 33/250 244x240 mm perforowana, na której osadzono płytki oraz transformator sieciowy.

Układ podzespołów wewnątrz obudowy został pokazany na **rysunku 6** wraz z wymiarowaniem. Takie rozmieszczenie elementów na panelu przednim i tylnym jest ergonomiczne, a zarazem umożliwia redukcję długości najważniejszych połączeń. Transformator sieciowy jest odsunięty od czułych obwodów wejściowych wzmacniacza,



co zmniejsza przenikanie przydźwięku sieciowego. Obudowa została spersonalizowana przez firmę EX-OR (usługa dodatkowo płatna) poprzez jej wycięcie, wyfrezowanie i nawiercenie w odpowiednich miejscach.

W płycie tylnej zostały wycięte otwory pod złącza sygnałowe, złącze zasilające IEC i dwa zaciski głośnikowe (rysunek 7). Użyte w prototypie gniazdo RCA zostało przykręcone dwiema śrubkami M3, z kolei gniazdo BNC ma cztery gwintowane otwory w rogach, idealnie pasujące pod śruby z gwintem M2,5.

Natomiast gruba płyta przednia musiała zostać nie tylko powiercona, lecz również miejscowo pocieniona (podfrezowana) aby możliwe było przykręcenie do niej oprawki diody LED, potencjometru regulacji głośności oraz wyłącznika sieciowego. Szczegóły znajdują się na rysunku 8. Wszystkie trzy elementy znajdują się w połowie wysokości płyty czołowej. Kreski na panelu przednim ułatwiają precyzyjne ustawienie pokrętki regulacji głośności, a jest ich więcej niż jedna na wypadek, gdyby któraś się starła w trakcie eksploatacji. Podłużne frezowanie od strony wnętrza obudowy służy zabezpieczeniu potencjometru regulacji głośności przed przekręcaniem się.

Boki obudowy są jednocześnie czarnymi radiatorami, które doskonale odprowadzają ciepło z tranzystorów. Zostało w nich wykonane łącznie siedem otworów z gwintem M3, które służą przykręceniu tych elementów półprzewodnikowych. Szczegółowe wymiary znajdują się na rysunku 9. Radiatory są na tyle duże, że chłodzenie pasywne jest całkowicie wystarczające.

Omówione tutaj rysunki znajdują się w materiałach dodatkowych. Każdy z nich występuje zarówno w formacie DXF jak i PDF, co ułatwia ich przeglądanie, zmodyfikowanie oraz przesłanie do firmy wykonującej wycięcia.

### Montaż

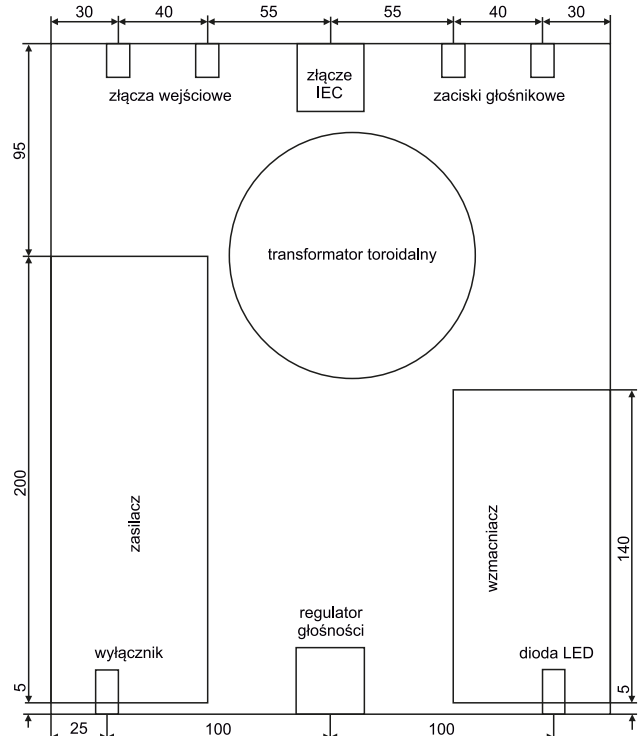
Płytki zasilacza i wzmacniacza należy przytwierdzić do płyty montażowej obudowy za pośrednictwem izolujących tulei dystansowych o długości 8 mm, najlepiej wykonanych z poliamidu. Najlepiej przykręcić je krótkimi śrubkami M3 do płytek, a dopiero potem włożyć w wykonane w płycie montażowej otwory. Wtedy można przykręcić gwinty tulei dystansowych nakrętkami od spodu. Płytę montażową trzeba nawiercić samodzielnie – zwykła wiertarka i ostre wierćko do metalu pozwolą wykonać to zadanie w kilkanaście minut.

Po takiej przmiarce można włożyć tranzystory mocy w przewidziane dla nich otwory na płytkach drukowanych,

przykręcić do radiatorów (ich nóżki trzeba będzie lekko dogiąć dla zachowania dobrego styku z powierzchnią radiatora) i przyłutować, choćby prowizorycznie. Potem tranzystory należy odkręcić, płytki wyjąć z obudowy, po czym poprawić lutowanie tranzystorów: wyprowadzenia skrótów i zalać pola lutownicze spoiwem. W ten sposób uzyskamy pewność, że tranzystory znajdą się dokładnie na swoich miejscach po przykręceniu płytek do obudowy, bez żadnych przesunięć które będą później trudne do zlikwidowania.

Na fotografii 4 zostały pokazane płytki z przylutowanymi tranzystorami, osadzone na stałe w obudowie. Pod tranzystory należy zastosować podkładki izolacyjne, zaś pod łebki śrub tulejki izolacyjne dla galwanicznego odseparowania ich od radiatorów. Warto pamiętać również o cienkiej warstwie pasty termoprzewodzącej dla poprawy przewodnictwa cieplnego.

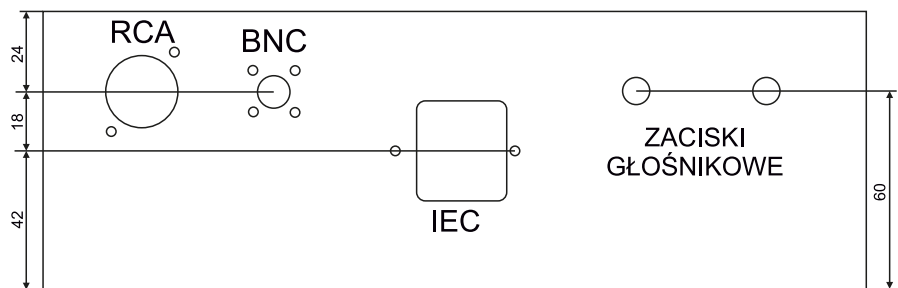
Transformator sieciowy można przykręcić do płyty montażowej używając do tego jednego z otworów jej perforacji – mają wystarczającą średnicę. Połączenia prowadzące



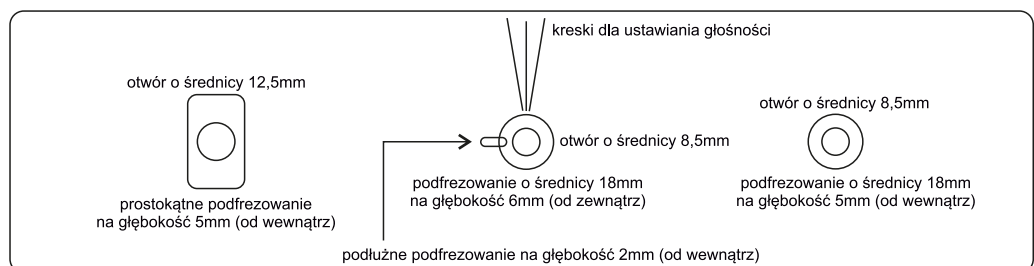
Rysunek 6. Rozmieszczenie podzespołów w obudowie (widok z góry)

napięcie sieciowe powinny być, w miarę możliwości, skręcone ze sobą dla zmniejszenia natężenia emitowanego przez nie pola o częstotliwości 50 Hz. Ta sama uwaga powinna dotyczyć przewodów uzwojenia wtórnego, które prowadzą do płytki zasilacza, lecz są one dosyć twarde i zachodzi obawa o ich złamanie. Szczegóły można zobaczyć na fotografii 5.

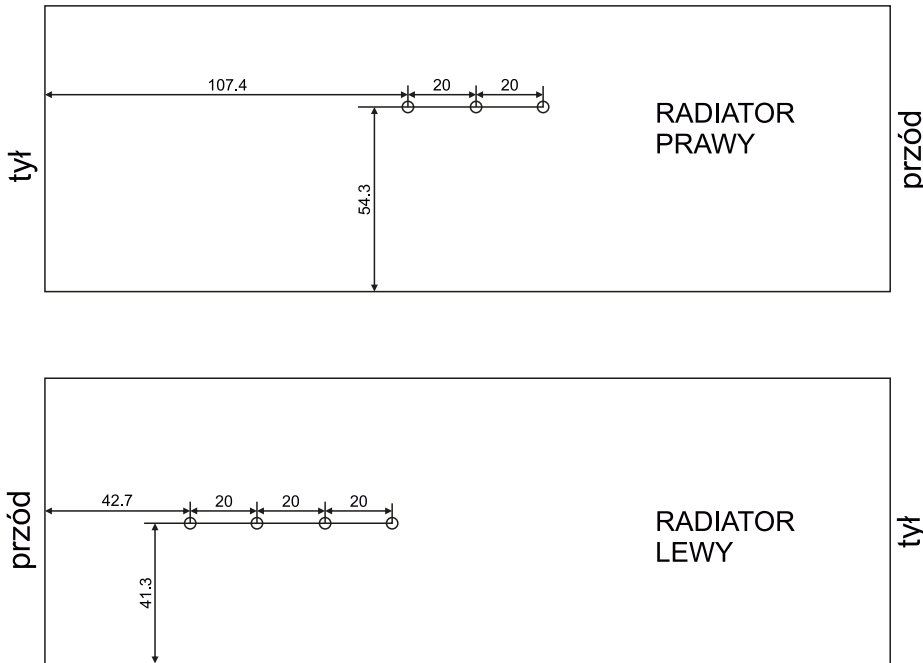
Na tej samej fotografii są widoczne również szczegóły montażu złącz na tylnej płycie oraz połączeń między nimi. Pod jedną ze śrubek mocujących gniazdo BNC do ścianki zostało podłożone oczko lutownicze, a do niego został



Rysunek 7. Szczegóły rozmieszczenia otworów na płycie tylnej (widok od wnętrza obudowy)



Rysunek 8. Szczegóły rozmieszczenia otworów i podfrezowanych obszarów na płycie przedniej (widok od przodu)



Rysunek 9. Rozmieszczenie gwintowanych otworów w obu radiatorach (widok od wnętrza obudowy)

dolutowany odcinek drutu łączący je z masą złącza RCA oraz bolcem PE złącza IEC. Obudowa jest połączona z masą układu tylko przy gniazdach sygnału wejściowego.

Od tego samego oczka lutowniczego został poprowadzony przewód łączący je z zaciskiem GND złącza J2 na płytce wzmacniacza. Z kolei przewód ekranowany, który łączy gniazda sygnałowe z potencjometrem, ma ekran połączony z masą tylko przy gniazdach

– przez ekran nie płynie prąd. Taki sposób prowadzenia masy gwarantuje brak pętli masy. Sygnał wyjściowy z potencjometru oraz jego masa są podłączone do zacisków złącza J2. Ponieważ odcinek pomiędzy potencjometrem a płytką wzmacniacza jest relatywnie krótki, nie użyto przewodu ekranowanego lecz opleciono przewód sygnałowy wokół przewodu masy. Można to zobaczyć na **fotografii 6**, a układ połączeń jest zgodny

z rysunkiem 3. W układzie prototypowym użyto gałki na potencjometr z precyzyjną podziałką, aby móc dokładnie ustawić żądany poziom głośności.

Potencjometr regulacji głośności ma wprowadzenia przystosowane do wlotowania ich w płytkę drukowaną. W układzie prototypowym zastosowano odpowiednią płytkę-prześciówkę, która ułatwia montaż, choć nie jest ona konieczna. Użyto jednej sekcji potencjometru, druga jest niepołączona.

Kontrolka LED ma przyłutowany szeregowo rezystor. Jej połączenia zostały zaizolowane odcinkiem rurki termokurczliwej, z której wychodzą dwa cienkie przewody. Łączą się z zaciskami V+ i V- złącza J1 płytki wzmacniacza.

Pola przekroju poprzecznego użytych przewodów są następujące:

- między płytkami zasilacza i wzmacniacza oraz do zacisków głośnikowych: 2,5 mm<sup>2</sup>
- do zasilania sieciowego, połączenie masy i sygnał z potencjometru: 1,5 mm<sup>2</sup>
- dioda LED: 0,22 mm<sup>2</sup>

Przewód ekranowany łączący gniazda wejściowe z potencjometrem regulacji głośności powinien mieć możliwie gruby ekran. Wystarczy aby miał jedną żyłę środkową. Przewody zostały pospinane ze sobą i/lub przytwierdzone do płyty montażowej opaskami zaciskowymi.

### Uruchomienie

Pierwsze uruchomienie nowo zbudowanego sprzętu zawsze wzbudza wiele emocji, ponieważ może wydarzyć się wiele rzeczy, trudnych do przewidzenia wcześniej, dlatego warto podzielić tę czynność na etapy. W ten sposób będziemy mieli gwarancję, że uruchamiając następny stopień, poprzedni jest w pełni sprawny.

Na początek proponowałbym odłączyć przewody V+ i V- od modułu wzmacniacza, dioda LED może pozostać podłączona do zasilacza. Włączamy napięcie sieciowe i sprawdzamy woltomierzem, czy napięcia między V+ i GND oraz GND i V- w złączu J2 zasilacza wynoszą około 25 V. Żaden element na płytce zasilacza nie powinien się w tym momencie silnie nagrzewać, jedynymi wyjątkami mogą być tranzystory T1 i T4 oraz T6 i T9, które osiągają temperaturę obudowy nie wyższą niż około 80°C.

Jeżeli test został zaliczony pomyślnie, należy wyłączyć zasilanie sieciowe i **rozładować kondensatory elektrolityczne zasilacza (na przykład rezystorem 1 kΩ o mocy 5 W podłączonym między V+ i V-)**, po czym wkręcić w złącza przewody łączące zasilacz z płytką wzmacniacza. Zaciski głośnikowe powinny być pozostawione bez obciążenia, zalecam też brak sygnału wejściowego. Potencjometry P1 i P2 warto ustawić w połowie, zaś P3 skręcić na minimum rezystancji,



Fotografia 4. Szczegóły montażu zmontowanych płytek w obudowie płytki wzmacniacza



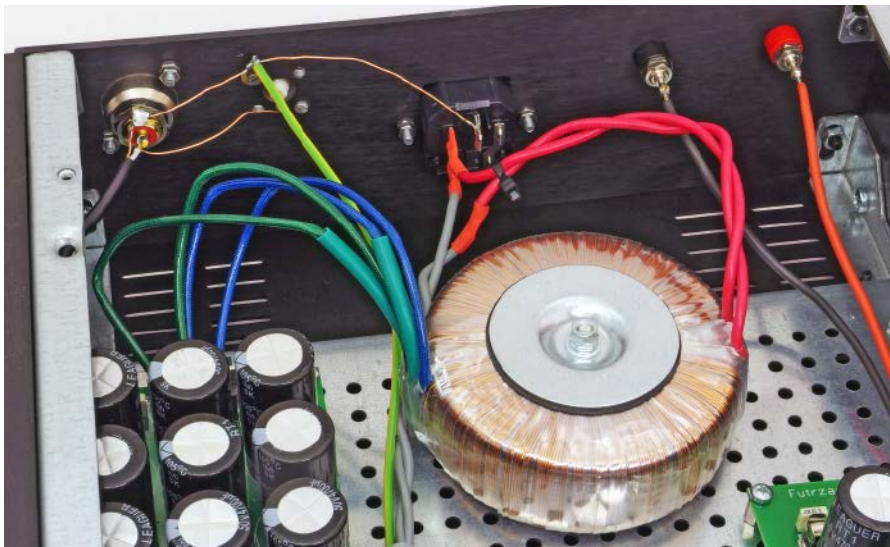
lub chociaż na kilkaset omów. Można to skontrolować omomierzem, którego końcówki zostaną przyciśnięte do wyprowadzeń bazy i kolektora tranzystora T8, znajdującego się pomiędzy tranzystorami MOSFET. Zapewni to zerowy prąd spoczynkowy tranzystorów mocy po włączeniu zasilania.

Tym razem woltomierz włączamy równoległe do wyprowadzeń rezystora R25 lub R26. Polecam przyczepić te przewody krokodylkami, ponieważ operacja ustawiania prądu spoczynkowego zajmie kilkanaście minut. Włączamy zasilanie i powoli zwiększamy rezystancję P3 (obracając jego główkę w stronę przeciwną niż poprzednio) aż na R25 lub R26 pojawi się spadek napięcia rzędu kilkunastu miliwoltów. Od tej pory polecam powoli manipulować P3, próbując uzyskać odczyt z woltomierza na poziomie 110 mV, co będzie odpowiadało prądowi spoczynkowemu 0,5 A ( $0,22 \Omega \cdot 0,5 \text{ A} = 110 \text{ mV}$ ). W miarę rozgrzewania się radiatora wokół tranzystorów mocy to napięcie będzie lekko spadało, wówczas należy ponownie doregulować położenie ślizgacza P3 – ta zabawa „w kotka i myszkę” potrwa około kwadransa. Docelowa temperatura radiatora chłodzącego tranzystory modułu wzmacniacza wynosi około 40°C. Tranzystory T4 i T5 oraz T6 i T7 będą wyraźnie ciepłe, ale w dopuszczalnych granicach.

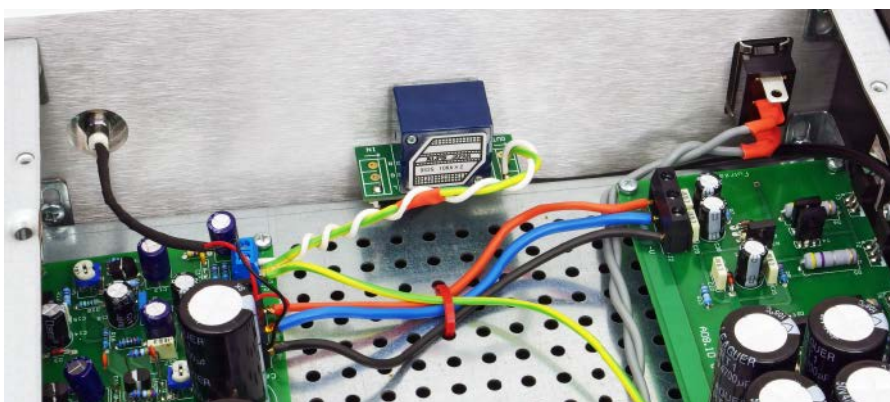
Po ustabilizowaniu się punktu pracy tranzystorów mocy, można odłączyć woltomierz od rezystora R25 (lub R26) i sprawdzić napięcia zasilające V+ i V-, czy nie uległy one wyraźnemu obniżeniu, co wskazywałoby na nieprawidłowe działanie zasilacza. W układzie modelowym te napięcia wynosiły odpowiednio 25,1 V oraz -24,5 V względem masy. Z kolei między bramkami tranzystorów MOSFET było napięcie o wartości 8,1 V (po nagraniu).

Pozostawiając włączone zasilanie, mając jednocześnie rozgrzany już układ, można przejść do ustawienia zerowej składowej stałej napięcia wyjściowego. Woltomierz podłączamy do zacisków głośnikowych i regulujemy P1 w ten sposób, aby uzyskać napięcie jak najbliższe wartości 0 mV.

Jeżeli i to się powiodło, układ jest w pełni gotowy do działania. Można wyłączyć



Fotografia 5. Szczegóły montażu transformatora sieciowego i podzespołów na płycie tylnej



Fotografia 6. Szczegóły montażu elementów na płycie przedniej

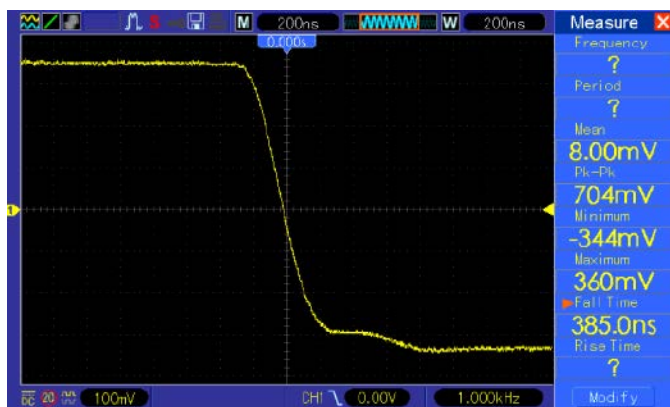
jego zasilanie, zamknąć obudowę, podłączyć kolumnę głośnikową oraz źródło sygnału i cieszyć się z czystego brzmienia ulubionej muzyki.

Nie omówiłem dotychczas roli potencjometru P2. Przy jego pomocy można ustawić symetrię przenoszenia, czyli wyrównać wzmocnienie dla dolnej i górnej połówki sygnału. Najłatwiej ewentualne zaburzenie w tej materii można zweryfikować oscyloskopem podłączonym do zacisków wyjścia głośnikowe i generatorem sygnału sinusoidalnego, o częstotliwości na przykład 1 kHz i amplitudzie 500 mV, podłączonym do wejścia. Jeżeli wartość minimalna i maksymalna sygnału

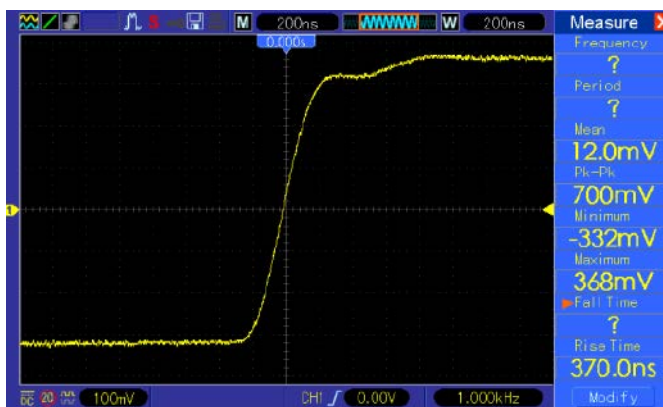
wyjściowego nie są sobie przeciwstawne, należy lekko doregulować P2. Jednak w praktyce ta regulacja jest zbędna, bowiem wypadkowa rezystancja „widziana” przez emityry T4 i T5 jest na tyle duża, że niewielkie różnice w napięciach kolektor-emiter nie mają praktycznego znaczenia i symetria „ustawia się sama”.

### Pomiary

Czym byłby wzmacniacz audio, gdyby nie zmierzyć chociażby jego podstawowych parametrów? W pierwszej kolejności sprawdzono czas narastania i opadania sygnału na wyjściu, co odbyło się przy użyciu sygnału



Rysunek 10. Oscylogram pokazujący zbocze opadające sygnału wyjściowego



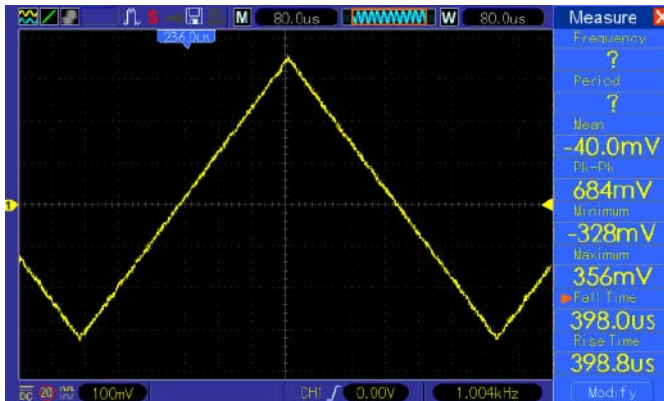
Rysunek 11. Oscylogram pokazujący zbocze narastające sygnału wyjściowego



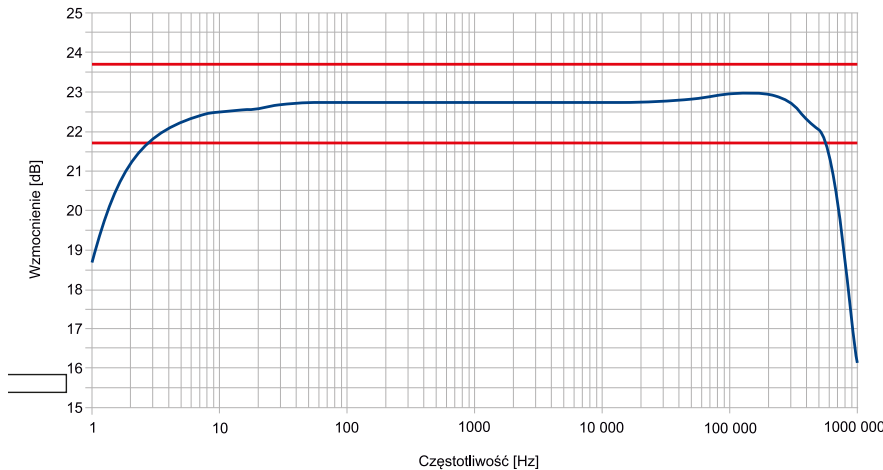
prostokątnego o częstotliwości 1 kHz i wartości międzyszczytowej 50 mV dla zachowania pracy małosygnalowej tranzystorów stopnia wejściowego. Obciążenie rezystancyjne 8  $\Omega$ , regulator głośności ustawiony na maksimum.

Oscylogramy są widoczne na **rysunku 10** i **rysunku 11**. Czas narastania, zmierzony automatycznie oscyloskopem, wyniósł 370 ns, a opadania 385 ns – są więc praktycznie takie same. Co istotne, zbocza nie są opatrzone charakterystycznymi „dzwonieniami”, które zdradzają nieprawidłową pracę pętli sprzężenia zwrotnego.

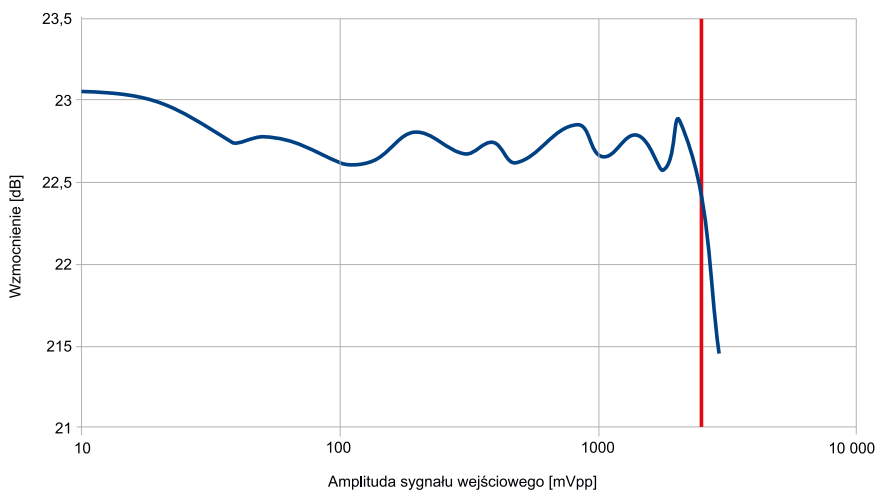
W kwestii jakości pracy wzmacniacza, a zwłaszcza zachowania fazy sygnału, dużo może powiedzieć przeprowadzenie przezeń sygnału trójkątnego. **Rysunek 12** to oscylogram sygnału wyjściowego przy parametrach takich samych, jak użyte były wcześniej – tyle, że zmieniono kształt z prostokątnego na trójkątny. Zbocza są symetryczne i proste a wierzchołki



**Rysunek 12.** Oscylogram pokazujący wyjściowy sygnał trójkątny



**Rysunek 13.** Charakterystyka amplitudowa wzmacniacza z zaznaczonymi krawędziami pasma  $\pm 1$  dB



**Rysunek 14.** Zależność wzmocnienia w funkcji amplitudy sygnału wejściowego

ostre, co świadczy o zgodności fazy wielu kolejnych harmonicznym sygnału.

Wstępne pozytywne wnioski na temat pracy wzmacniacza można rozwinąć poprzez ocenę jego charakterystyki amplitudowej, znajdując się na **rysunku 13**. Za odniesienie (0 dB) przyjęto taką amplitudę sinusoidalnego sygnału wejściowego, przy której moc wyjściowa wynosi 1 W dla częstotliwości 1 kHz. W układzie prototypowym było to 585 mVpp.

Pasma przenoszenia, rozumiane jako punkty w których charakterystyka amplitudowa spada o 3 dB poniżej wartości referencyjnej, jest najczęściej stosowane do urządzeń

audio. Ale sprzęt z najwyższej półki jest oceniany według surowszego kryterium – spadku o 1 dB. Na rysunku dodano linie pomocnicze, wyznaczające granice pasma 1 dB. Według nich, ten wzmacniacz przenosi sygnał o częstotliwości od około 3 Hz do około 55 kHz, czym zadowoli nawet najlepiej wytrenowany słuch.

Następnie oceniono liniowość wzmacniacza, czyli stałość wzmocnienia w funkcji amplitudy sygnału wejściowego. To badanie przeprowadzono przy użyciu sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 1 kHz. **Rysunek 14** dowodzi, że w całym użytecznym zakresie amplitudy sygnału wejściowego, fluktuacje wzmocnienia mieszczą się w paśmie o szerokości 0,5 dB. Czerwoną linią zaznaczono moment, w którym wzmacniacz zaczyna niekształcać. Powyżej tego punktu wzmocnienie w naturalny sposób spada, gdyż amplituda sygnału wyjściowego już nie wzrasta, a wyjściowego owszem.

## Eksplatacja

Omówiony w tym artykule wzmacniacz jest przystosowany do pracy z obciążeniem o nominalnej impedancji 8  $\Omega$ . Kolumny głośnikowe o mniejszej wartości tego parametru, na przykład 4  $\Omega$  mogą przeciążyć końcówkę mocy oraz zasilacz, zwłaszcza przy silnymysterowaniu.

Maksymalna, nieznieształcona moc wyjściowa wynosi około 15 W. Końcówka mocy pracuje ze znacznym prądem spoczynkowym (0,5 A po nagraniu, około 0,75 A przy zimnych tranzystorach), więc w cichszych partiach dźwięku pozostaje w klasie A – przechodzi w klasę B dopiero przy silnymysterowaniu. Układ bezgłośnie załącza się oraz wyłącza, bez jakichkolwiek dźwięków, które dochodziłyby w tych momentach z głośnika.

Temperatura radiatorów podczas pracy niemal nie zależy odysterowania i sięga 40°C w warunkach pokojowych i ze szkodliwym wpływem powietrza wokół ich żeber. Nie zalecam zakrywania radiatorów ani otworów chłodzących obudowy, może dojść do przegrzania układu.

W układzie nie ma elektronicznego zabezpieczenia przed przeciążeniem ani przed zwarcieniem zacisków wyjściowych. Z tego powodu zalecam ostrożność przy podłączaniu głośników. Natomiast układ nie uszkodzi się, jeżeli obciążenie odłączy się w trakcie pracy, nawet przy wysokiej amplitudzie sygnału wejściowego.

Układ wzmacniacza jest podatny na modyfikacje, zwłaszcza na zwiększenie dopuszczalnej mocy wyjściowej. Trzeba w tym celu, przede wszystkim, zwiększyć napięcie zasilające końcówkę mocy, co wiąże się z wymianą transformatora sieciowego oraz rezystorów R7 i R13 w zasilaczu. Kondensatory elektrolityczne mają spory zapas dopuszczalnego napięcia.

Michał Kurzela, EP