

Krytyczne parametry wzmacniacza mocy

Artykuł z serii autorskich lekcji.

Chcesz zbudować wzmacniacz o dużej mocy? Jak odprowadzić ciepło ze wzmacniacza? Dlaczego wzmacniacz tak się grzeje? Skąd się bierze ciepło? Aby wyjaśnić te skomplikowane zagadnienia najlepiej zrobić to na przykładzie. Dla nas przykładem będzie wzmacniacz oparty o układ scalony TDA7294 użyty chociażby w projekcie „Wzmacniacz 100W” na stronie 62. Zapoznaj się z parametrami tej kostki znajdującymi się we wspomnianym artykule i schematem aplikacyjnym (rysunek 1) oraz z niektórymi ważniejszymi charakterystykami – rysunek 2. Jakie możliwości i ograniczenia tu występują?

Analizę możliwości i ograniczeń należy rozpocząć od napięć i prądów związanych z głośnikiem.

W urządzeniach stacjonarnych (domowych) stosuje się zestawy głośnikowe o oporności 8Ω. Dla ułatwienia obliczeń zakładamy, że chodzi tu o rezystancję równą 8Ω, co jest pewnym niewielkim uproszczeniem, ale dla naszych rozważań takie uproszczenie nie ma znaczenia.

Aby uzyskać z głośnika upragnioną przez wielu zapalonych elektroników moc, „magiczne” 100 watów, należy do niego doprowadzić przebieg o odpowiednio dużym napięciu i dużym prądzie. W obliczeniach należy skorzystać ze znanego wzoru:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 \times R$$

Po przekształceniach otrzymuje się:

$$U = \sqrt{P \times R}$$

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

Dla głośnika 8-omowego moc 100W otrzymuje się przy następujących wartościach napięcia i prądu:

$$U = \sqrt{100 \times 8} = \sqrt{800} = 28,28V$$

$$I = \sqrt{\frac{100}{8}} = \sqrt{12,5} = 3,54A$$

Są to wartości skuteczne napięcia i prądu, a więc dla niezniekształconego przebiegu sinusoidalnego wartości szczytowe są $\sqrt{2}$ razy większe, natomiast międzyszczytowe $2\sqrt{2}$ razy większe.

Stąd międzyszczytowe napięcie sinusoidalne na wyjściu wzmacniacza i na głośniku wyniesie: $U_{pp} = 28,28V \times 2 \times \sqrt{2} = 28,28 \times 2 \times 1,41 = 80V$ natomiast prąd szczytowy:

$$I_p = 3,54A \times \sqrt{2} = 3,54 \times 1,41 = 5A$$

Zastosowany wzmacniacz musi więc dostarczyć do głośnika szczytowy prąd nie mniejszy niż 5A.

W przypadku klasycznego wzmacniacza (nie mostkowego), całkowite napięcie zasilające na pewno musi być większe niż 80V ($\pm 40V$ w przypadku zasilania symetrycznego). Musi być większe, bo każdy wzmacniacz charakteryzuje się tak zwanym napięciem nasycenia - wynoszącym kilka do kilkunastu woltów w zależności od konstrukcji wzmacniacza.

Dla uzyskania mocy 100W w głośniku 8-omowym napięcie zasilające musi więc wynosić około 90V ($\pm 45V$).

Zapamiętaj to raz na zawsze: **jeśli z klasycznego wzmacniacza chcesz uzyskać na oporności 8Ω moc 100W, to całkowite napięcie zasilające musi wynosić minimum 90V!**

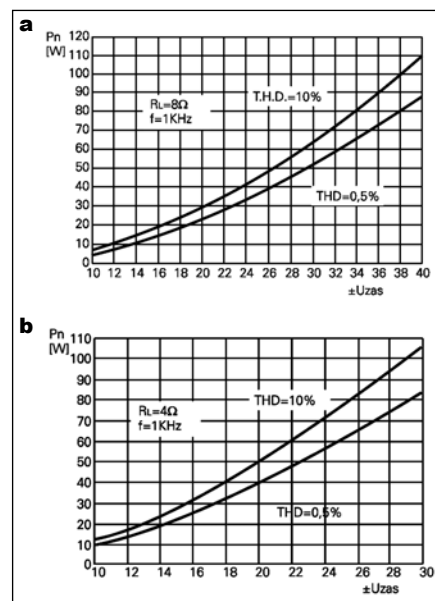
I tu masz pierwszą trudność - nawet przy współczesnej technice nie jest łatwo wykonać w strukturze układu scalonego tranzystory wytrzymujące napięcie rzędu 100V i pracujące przy prądach rzędu 5A.

Na dodatek popularne tranzystory bipolarnie mają nieprzyjemną właściwość - przy wystąpieniu na nich jednocześnie znacznego napięcia i dużego prądu występuje w nich tak

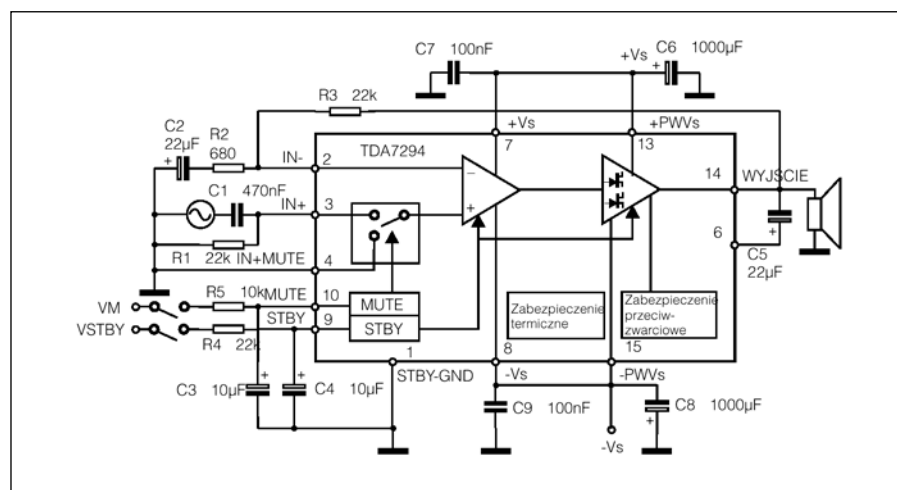
zwane zjawisko drugiego przebiecia, podczas którego w ułamku sekundy ulegają nieodwracalnemu uszkodzeniu. Tymczasem w warunkach rzeczywistych, przy obciążeniu wzmacniacza zestawem głośnikowym nie trudno o powstanie takich niesprzyjających warunków. Związane to jest z jednej strony z pojemnością kabla połączeniowego, a z drugiej z indukcyjnością cewki głośnika.

Wyjściowe tranzystory we wzmacniaczach mocy muszą więc być projektowane z odpowiednim zapasem, a dodatkowo układ

Rys. 2



Rys. 1 Schemat aplikacyjny TDA7294



musi być wyposażony w skuteczne obwody zabezpieczenia przed wszelkimi zagrożeniami, jakie mogą wystąpić zarówno podczas pracy wzmacniacza, jak i przy wyłączeniu zasilania.

W kostce TDA7294 w stopniu wyjściowym zastosowano tranzystory MOSFET, co znacznie upraszcza problem zabezpieczeń.

Co prawda sprawa tych zabezpieczeń to zmartwienie konstruktorów układu scalonego, jednak użytkownik wykorzystujący taki układ scalony także napotyka realne ograniczenia.

Dla każdego układu scalonego producent podaje maksymalne napięcie zasilające. Dla współczesnych monolitycznych układów scalonych mocy nie przekracza ono 100V ($\pm 50V$). Dla kostki TDA7294 wynosi właśnie $\pm 50V$. Czyli takie może być napięcie zasilające w stanie spoczynku.

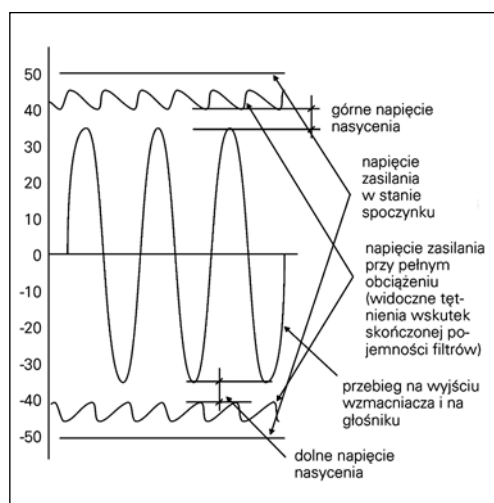
Podczas pracy, gdy układ oddaje pełną moc 100W napięcie zasilania z pewnością nieco się obniży. Po pierwsze wynika to z oporności wewnętrznej użytego transformatora sieciowego, po drugie z tętnień, które pojawiają się wskutek skończonej pojemności kondensatorów filtrujących w zasilaczu. **Przy okazji trzeba tu podkreślić, że we wzmacniaczach większej mocy stosuje się zasilacze niestabilizowane - nie spotyka się zasilaczy stabilizowanych do końcówek mocy.**

Napięcie niestabilizowanego zasilacza będzie więc, jak potocznie mówimy - „przysiadac” przy obciążeniu pełną mocą. Ale aby uzyskać potrzebną moc napięcie to ani na chwilę nie może zmniejszyć się poniżej obliczonego wcześniej poziomu.

Ilustruje to **rysunek 3**.

Przedstawione tu fakty są często pomijane przez amatorów - w rezultacie rzeczywista maksymalna moc wyjściowa wzmacniacza bywa znacznie mniejsza od przewidywanej, wynikającej z danych katalogowych układu scalonego.

Rys. 3 Napięcie we wzmacniaczu mocy



Powtórzę to jeszcze raz: aby z kostki TDA7294 uzyskać moc wyjściową równą 100W na oporności 8Ω , należy zastosować odpowiednio „szybki” układ zasilania, który w spoczynku da napięcie nie większe niż 100V ($\pm 50V$), a przy pełnym obciążeniu nie spadnie poniżej 90V ($\pm 45V$). W praktyce oznacza to konieczność zastosowania transformatora toroidalnego o odpowiednim napięciu i mocy, oraz kondensatorów filtrujących o znacznych pojemnościach, rzędu dziesiątków tysięcy mikrofaradów!

Ktoś, kto zetknął się już z obliczeniami mocy stwierdzi, że potrzebną moc wyjściową 100W, a nawet większą można łatwo uzyskać przy oporności obciążenia równej 4Ω . Spostrzeżenie słuszne, ale jakby nie do końca.

Rzeczywiście z obliczeń wynika, iż moc 100W na oporności 4Ω otrzyma się przy:

$$U_{sk} = \sqrt{100 \times 4} = 20V$$

czyli $U_{pp} = 56,4V$

stad całkowite napięcie zasilające wyniesie „tylko” około 66...70V.

Ale za to prąd wyjściowy musi być większy:

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{100}{4}} = 5A$$

co daje wartość szczytową I_p równą 7,1A. Układ TDA7294 ma według katalogu szczytowy prąd wyjściowy równy 10A, więc rzeczywiście przy obciążeniu 4Ω można uzyskać z kostki moc nawet większą od 100W.

Problem tylko w tym, że typowe domowe zestawy głośnikowe, zwane potocznie kolumnami, z reguły mają oporność 8, a nie 4Ω ...

Ale jak by nie było kostka TDA7294 może w pewnych warunkach dostarczyć mocy użytecznej ponad 100W.

Czy można więc „wycisnąć” z niej ponad 100 watów mocy użytecznej?

Do tej pory omówiłem jedną z ważniejszych spraw - kwestię napięcia zasilania w zależności od oporności obciążenia.

Drugą równie ważną sprawą są moce.

I tu znów parę słów wyjaśnienia.

Zacznijmy od pewnego mitu, funkcjonującego wśród elektroników. Dochodzą mnie wiadomości, że nawet niektórzy nauczyciele w szkołach średnich uczą, iż wzmacniacz mocy musi mieć oporność wyjściową (czyli rezystancję wewnętrzną) równą rezystancji obciążenia, bo wtedy do tego obciążenia może być i jest przekazywana maksymalna moc. Czyli wzmacniacz współpracujący z kolumną 8-omową musiałby mieć rezystancję wyjściową równą 8Ω .

Taki pogląd jest totalną bzdurą!!!

Owszem dopasowanie rezystancji ma miejsce w wielu układach elektronicznych, ale nie we wzmacniaczach mocy! Rezystancja wyjściowa (we-

wnętrzna) wzmacniacza mocy wynosi drobny ułamek oma.

Jeśli rezystancja wewnętrzna byłaby równa rezystancji obciążenia, to wydzielalaby się na niej taka sama moc, jak na obciążeniu. Sprawność byłaby więc na pewno mniejsza niż 50%. A przecież wiadomo, że przyzwoity wzmacniacz mocy klasy AB ma sprawność ponad 60%.

Zapomnijmy więc o pojęciu zupełnie zbędnym w praktyce - o rezystancji wyjściowej (wewnętrznej) wzmacniacza.

Nie możemy natomiast zapomnieć o mocach. Żaden wzmacniacz nie ma sprawności równej 100%. To znaczy, że jeśli wzmacniacz oddaje do głośnika moc użyteczną P_u równą 100W, to pobiera z zasilacza moc zasilania P_{zas} znacznie większą. Różnica tych mocy zamienia się na ciepło - jest sto tak zwana moc strat P_{str} . Mamy więc:

$$P_{zas} = P_u + P_{str}$$

Sprawność wzmacniacza określimy jako:

$$\eta = P_u / P_{zas}$$

Nie będę tu przeprowadzał szczegółowych obliczeń, bo nie ma to sensu praktycznego.

Najprościej licząc, wzmacniacz o sprawności 66,6% który ma oddawać moc ciągłą 100W pobierze z zasilacza moc 150W. Zapamiętaj więc, że aby uzyskać ciągłą moc wyjściową równą powiedzmy 100W, musisz zastosować transformator o mocy większej niż 150W!

A transformator 150-watowy ma znaczny ciężar i wymiary.

Ale to nie wszystko!

Na **rysunku 4a** znajdziesz wykres pokazujący zależność mocy strat wzmacniacza z kostką TDA7294 w zależności od mocy wyjściowej (przekazywanej do głośnika) dla kilku wartości napięcia zasilającego i rezystancji obciążenia równej 8Ω . Przeanalizuj dokładnie ten wykres.

I co?

Zapewne z przerażeniem stwierdziłeś, że największa moc jest tracona nie przy pełnej mocy, tylko przy mocach około trzykrotnie mniejszych od mocy maksymalnej. Oznacza to, że sprawność wzmacniacza przy takich mocach spada z wartości ponad 75% (przy mocy maksymalnej) do wartości poniżej 50%!

Jednak nie o liczbową wartość sprawności tu chodzi - w praktyce interesuje nas właśnie moc tracona, bo od wartości tej mocy zależy wielkość radiatora, jaki będziemy musieli zastosować.

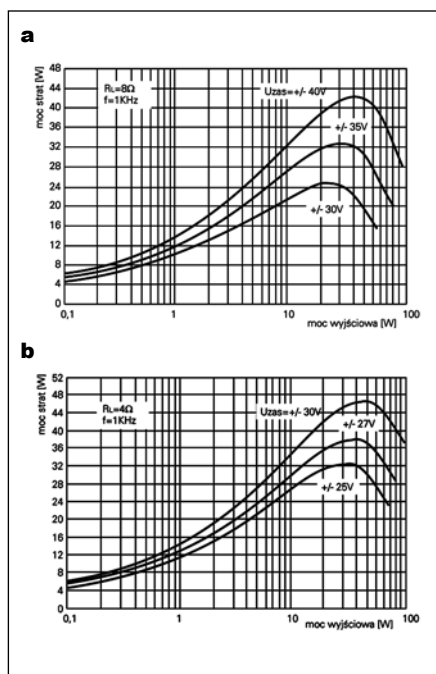
Popatrz więc jeszcze raz na rysunek 4. Jeśli chcesz uzyskać moc maksymalną rzędu 100W, to musisz pracować przy napięciach zasilających ponad 80V ($\pm 40V$). A to oznacza dużą moc strat przy mniejszych mocach wyjściowych. Musisz więc zastosować skuteczny radiator do odprowadzenia ciepła strat. A to może być problemem...

Jeśli jednak pogodzisz się ze zmniejszeniem maksymalnej mocy wyjściowej do 60W, to możesz obniżyć napięcie zasilające

do wartości około 70V ($\pm 35V$) i wtedy niemal o połowę zmniejszą się straty mocy i będziesz mógł zastosować znacznie mniejszy radiator.

Czy zmniejszenie mocy o 40% nie spowoduje radykalnego zmniejszenia głośności?

Nie! Trzeba pamiętać, że ucho ludzkie ma charakterystykę w przybliżeniu logarytmiczną i takie zmniejszenie mocy wywoła zauważalną, ale naprawdę niezbyt wielką różnicę głośności.



Rys. 4

Ponadto koniecznie trzeba tu uwzględnić skuteczność kolumn. Jeśli masz możliwość, to porównaj, jak bardzo różnią się głośnością kolumny i głośniki przy tej samej mocy dostarczanej. Okaze się, że tanie kolumny kupowane za grosze na bazarze grają bardzo cicho, nawet w porównaniu z głośnikiem wyjętym ze starego radia czy telewizora. Więcej „zarobisz” stosując porządne kolumny, niż zwiększając moc wzmacniacza! Zapamiętaj to raz na zawsze!

No tak, ale przypuśćmy, że już masz estradowe kolumny 4-omowe i chcesz jednak za wszelką cenę zrobić wzmacniacz o mocy ponad 100W.

Z podanych informacji wynika, że z układu TDA7294 można uzyskać więcej niż 100W mocy.

Chcesz „wyduścić” z kostki ile tylko się da. Nie zamierzasz obniżyć napięcia. Do zasilania użyjesz bardzo „szywnego” transformatora toroidalnego o mocy 450W i napięciu wyjściowym $2 \times 35V$, co po wyprostowaniu i wyfiltrowaniu da ci $\pm 50V$. Zakładając, że uzyskasz na 4-omowym głośniku napięcie międzyszczytowe 80W, planujesz uzyskać 200W mocy użytecznej. Wszystko się zgadza - przelicz, jeśli

nie wierzysz! Upewniasz się jeszcze: szczytowy prąd wyjściowy kostki wynosi 10A - po krótkim rachunku także ci wychodzi, że uzyskasz moc 200W! W katalogu znajdziesz zresztą wzmiankę, że maksymalna moc muzyczna przy zasilaniu $\pm 40V$, obciążeniu 4Ω i zniekształceniach 10% wynosi 180W!

Rewelacja!

A radiator? Drobiazg. Zastosujesz tak duży, jak będzie trzeba - nie będziesz żałował miejsca... Stop!

Tu popełniłeś błąd!

Pomijasz sprawę odprowadzania ciepła strat, a tego nie wolno robić. Może jeszcze zaprotestujesz, że przecież dasz tak duży radiator, jak będzie trzeba... Ale nawet zwiększanie radiatora w nieskończoność, czy zastosowanie radiatora chłodzonego wodą nic tu nie pomoże.

Doszliliśmy tu do bardzo ważnej i słabo rozumianej sprawy - rezystancji cieplnych. Powiem tylko w skrócie, że w każdym scalonym wzmacniaczu mocy właśnie rezystancja cieplna między aktywną strukturą, a radiatorem jest niemal dosłownie wąskim gardłem, które ogranicza maksymalną moc użyteczną.

Chodzi o to, że ciepło wydzielane w strukturach tranzystorów wyjściowych musi przejść przez podłoże - płytek krzemu - do metalowej wkładki radiatorowej układu scalonego i dalej do radiatora. Właśnie tu leży główna część problemu wzmacniaczy mocy. Choćbyś nie wiem jak zwiększał radiator, nie masz wpływu na wspomniane wąskie gardło związane z przepływem ciepła ze struktury półprzewodnika do radiatora.

Wąskim gardłem nie jest więc radiator. Rzeczywiście można wykonać radiator o rewelacyjnych możliwościach rozpraszania ciepła. Zwiększy to trochę możliwości odprowadzania ciepła, ale tylko do pewnej granicy określonej przez wspomniane wąskie gardło. A tu widać, że wszystko w rękach konstruktorów układu scalonego. Starają się oni jak mogą, ale i tak nie mogą skutecznie zlikwidować tego wąskiego gardła. Ze względów technologicznych dla zmniejszenia oporności cieplnej metalowa wkładka radiatorowa jest łączona z podłożem układu, czyli w praktyce z ujemną końcówką zasilania. Jest to niezbyt wygodne, bo radiator ma potem potencjał ujemnego napięcia zasilającego i trzeba go odizolować od metalowej obudowy wzmacniacza, która zwykle jest połączona z masą. Co prawda można zastosować mikową czy silikonową przekładkę izolacyjną między układem scalonym a radiatorem, ale to jeszcze bardziej zwięzi wspomniane wąskie gardło.

Jeśli więc weźmie się pod uwagę wszystkie rezystancje cieplne między złączem a otoczeniem i dopuszczalne temperatury, to okaże się, że w żaden sposób nie uda się osiągnąć mocy ciągłej wynikających z obliczeń opierających się na napięciach i prądach maksymalnych.

Tak jest i w przypadku wspomnianej wielokrotnie kostki. Podana w katalogu moc muzyczna (110W przy 8Ω i 180W przy 4Ω) może być oddawana tylko przez krótką chwilę. Jeśli nawet zastosujesz odpowiednio potężny zasilacz i radiator, a potem „dasz czadu” pracując z mocami od jednej czwartej do pełnej mocy maksymalnej, to po dosłownie kilku sekundach wskutek istnienia wąskiego gardła w przepływie ciepła, temperatura struktury wzrośnie powyżej $+150^\circ$ i wzmacniacz...

co prawda nie ulegnie uszkodzeniu, ale wyłączy się po zadziałaniu obwodu zabezpieczenia termicznego.

Krótko mówiąc, nie będziesz miał pożytku z takiego wzmacniacza. Wskutek zwiększenia napięcia zasilającego i zmniejszenia rezystancji obciążenia spowodujesz znaczne zwiększenie mocy strat (porównaj rysunek 4). Duża ilość ciepła nie będzie w stanie szybko przejść przez wąskie gardło i wzmacniacz będzie się wyłączał.

Istnieje więc jakaś granica opłacalności. Z jednej strony w pogoni za mocą wyjściową zwiększamy napięcie zasilające, moc zasilacza i rozmiary radiatora. To wszystko kosztuje. Jednocześnie tym samym zwiększamy ilości wydzielanego ciepła strat, które wskutek wąskiego gardła w przepływie ciepła doprowadzi w końcu do wyłączania się układu w czasie pracy, a może nawet do uszkodzenia układu scalonego.

Sprawa nie jest więc wcale taka prosta, jak wyglądałoby na pierwszy rzut oka, zwłaszcza, gdy chcemy zbudować estradowy „heavy” wzmacniacz, przeznaczony do naprawę ciężkiej pracy.

Inaczej jest ze wzmacniaczem na potrzeby domowe. Tu rzeczywiście zadowolą nas chwilowa moc wyjściowa rzędu 100W, potrzebna w bardzo nielicznych utworach do wiernego oddania krótkich głośnych partii utworu.

Przedstawione rozważania powinny „sprowadzić na ziemię” wszystkich tych, którzy chcieliby z monolitycznych układów scalonych uzyskiwać w sposób ciągły moce bliskie podawanym w katalogu mocom muzycznym.

Nie znaczy to, że kostki takie są nieprzydatne.

Wprost przeciwnie! Wykorzystanie gotowych układów scalonych umożliwia budowę wzmacniaczy o znacznej mocy także początkującym i niezbyt zaawansowanym. Natomiast wbrew pozorom, wykonanie wzmacniacza o dobrych parametrach i mocy powyżej 20...30W z elementów dyskretnych to zadanie dla doświadczonego elektronika.

Wzmacniacz - z naszą przykładową kostką - TDA7294 można więc polecić wszystkim, którzy chcieliby bez specjalnego trudu zbudować wzmacniacz o mocy do 100W.

Piotr Górecki