

Projektowanie wzmacniaczy audio klasy D

Rosnąca popularność przenośnych urządzeń multimedialnych oraz tendencja do miniaturyzacji urządzeń spowodowały zmianę technologiczną: używane do niedawna wzmacniacze mocy audio pracujące w klasie AB zostały zastąpione przez rozwiązania o wysokiej sprawności i zajmujące niewiele miejsca na płycie drukowanej. Przykładem mogą być wzmacniacze klasy D, osiągające znakomitą sprawność, wynoszącą powyżej 90%. W niniejszym artykule przyjrzymy się zagadnieniom konstrukcyjnym oraz dostępnym rozwiązaniom układowym bazującym na nowych architekturach. Pozwalają one traktować wzmacniacze klasy D jako opłacalną alternatywę dla układów klasy AB.

Wprawdzie podstawowe bloki funkcjonalne składające się na wzmacniacz pracujący w klasie D są bardzo proste, to jednak implementacja układu w ramach urządzenia lub systemu jest wyzwaniem konstrukcyjnym w kilku kluczowych obszarach. Poprawny projekt układu oraz właściwe rozmieszczenie komponentów na płycie drukowanej jest kluczowe dla osiągnięcia minimalnego poziomu zakłóceń oraz zadowalającego poziomu sprawności energetycznej.

Wartość wzmocnienia układu wzmacniacza w klasie D ogranicza napięcie wejściowe maksymalnie do $\sqrt{P_o \cdot R_i} / A_v$, gdzie A_v jest wartością wzmocnienia. Większa wartość sygnału wejściowego skutkuje pojawieniem się zniekształceń związanych z obcinaniem wierzchołków, które mogą uszkodzić stopień mocy na skutek pojawienia się przewodzenia skrośnego i ścieżki niskiej impedancji do szyny zasilającej. Aby wyeliminować to zjawisko producenci dodają dodatkowy układ (tzw. slicer) zapewniający automatyczną regulację i obniżenie wzmocnienia dla dużych sygnałów wejściowych. Powinno się też pamiętać, że w roli wejściowego kondensatora szeregowego często wykorzystuje się element z dielektrykiem ceramicznym X7R lub Y5V, co zapewnia niewielkie rozmiary, niską wartość ESR, małe szумы i długi czas działania,

ale audiofile – z uwagi na brak pasożytniczych rezonansów – preferują raczej kondensatory polipropylenowe.

Zasadniczym wyzwaniem dla wzmacniaczy klasy D jest zapewnienie bezpiecznej pracy dla stopnia mocy oraz niskich zniekształceń THD. Wymagania w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa stają się istotne przy wykorzystaniu alternatywnych rozwiązań stopnia przełączającego z wykorzystaniem układu półmostkowego lub pełnomostkowego. Górne i dolne tranzystory w takim układzie muszą być przełączane dostatecznie szybko, aby możliwe było zachowanie minimalnego czasu martwego pomiędzy przełączeniami, co zapewnia brak przepływu niszczącego tranzystory prądu skrośnego, jaki pojawia się przy otwartym tranzystorze górnym i dolnym w układzie mostka. Z kolei zwiększenie czasu martwego pomiędzy przełączeniami jest niekorzystne bo zwiększa THD. Idealny kompromis pomiędzy bezpieczeństwem pracy stopnia mocy, a koniecznością minimalizacji czasu martwego, musi być zatem dokładnie wyważony.

Skończony czas przełączania wyjściowych tranzystorów MOSFET jest determinowany głównie przez pojemność bramka-źródło oraz w mniejszym stopniu, przez pojemność dren-źródło, natomiast elementy

na drodze sygnału pomiędzy głośnikiem a szyną zasilającą w największym stopniu determinują sprawność. Mają na nią wpływ rezystancja dren-źródło tranzystorów, jak również parametry wyjściowego filtra, zgodnie z równaniem 3.

Projektant powinien rozważyć użycie takich tranzystorów MOSFET, które łączą w sobie zarówno niską pojemność C_G jak i niską wartość R_{DS} , co zapewnia dużą sprawność i pozwala na osiągnięcie granicznych parametrów podanych w specyfikacji. Warto zauważyć, że rozwiązania układów scalonych dostępne na rynku są ukierunkowane na współpracę z określonymi typami tranzystorów MOSFET, po to, aby uzyskać optymalne charakterystyki czasu martwego. W stosunku do zintegrowanych układów wzmacniaczy typu SoC, gdzie w jednym układzie zawarte są wszystkie obwody wzmacniacza łącznie ze stopniem mocy, wersje z zewnętrznymi MOSFET-ami pozwalają konstruktorom wybierać spośród ogromnego asortymentu podzespołów dostępnych na rynku. Producenci półprzewodników, tacy jak na przykład IRF, mają w ofertach tranzystory specjalnie przystosowane do pracy w stopniach mocy wzmacniaczy klasy D. Na przykład DirectFET IRF6645 ma $R_{DS} = 53 \text{ m}\Omega$, a $Q_G = 8,4 \text{ nC}$.

Oferta gotowych układów scalonych do wzmacniaczy klasy D jest również spora, jednak jak na razie zniekształcenia THD podawane w kartach katalogowych w odniesieniu do mocy wyjściowej trudno porównywać z standardowymi układami klasy AB, ponieważ nominalna moc wyjściowa jest tu określana przy 10% THD. Dodatkowo, niektóre układy wzmacniaczy mają nierówną charakterystykę częstotliwościową. Jest to skutek starań producentów o uzyskanie możliwie największej sprawności, a w przenośnych urządzeniach multimedialnych, gdzie wykorzystywane są niewielkie głośniki, nie ma to znaczenia.

Wartość THD może zostać w poprawioną przez niepełne obciążenie wzmacniacza i pracę z ułamkiem mocy wyjściowej, co likwiduje szereg wad układów pracujących w klasie D.

Wzmacniacze klasy D budowane są w dwóch głównych topologiach bazujących na standardowej modulacji szerokości impulsu PWM lub delta-sigma PDM. Ta druga technika sterowania jest preferowana przez Analog Devices, co jest wynikiem tego, że sterowanie PWM powoduje powstawanie ostrych zboczy w sygnale wyjściowym i emisję wielu harmonicznych w paśmie AM. Takich zjawisk nie ma przy modulacji gęstości impulsów PDM. Układ Analog Devices ADAU1590 (z zegarem 6,144 MHz) jest przykładem takiej konstrukcji, która wykorzystuje modulator sigma-delta piątego rzędu. Układy z modulacją PDM zawsze bazują na zwielokrotnionej częstotliwości sygnału zegarowego, natomiast PWM działają na częstotliwości podstawowej.

Producenci, tacy jak na przykład TI, oferują także cyfrowe wersje wzmacniaczy, których przykładem jest PurePath, zawierające cyfrowe wejścia i przetwarzające sygnał w postaci cyfrowej aż do wyjściowego filtra dolnoprzepustowego.

Obecnie projekty układów o wysokiej jakości wymagają budowy pętli sprzężenia zwrotnego z wyjściowego filtra po to, aby zredukować THD. W czasie projektowania należy upewnić się za pomocą analizy rozkładu biegunów i zer w transmitancji lub poprzez symulacje, czy działanie pętli sprzężenia zwrotnego jest stabilne.

Częstotliwość sygnału zegarowego o kształcie trójkątnym powinna zostać ustalona możliwie jak najwyżej, aby zmniejszyć rozmiary dławika wyjściowego w filtrze dolnoprzepustowym. Jest to istotne zwłaszcza w przypadku, gdy układ wzmacniacza nie zawiera filtra wyjściowego i wykorzystuje do tego celu impedancję blisko umieszczonego głośnika (do 10 cm). Niemniej duże prądy płynące w tym przypadku przez obwody wyjściowe i związana z tym koniecz-

ność zapewnienia dużej mocy sterowania dla tranzystorów związanej z przełączaniem pojemności bramka-źródło, co może obniżyć sprawność.

W większości aplikacji związanych ze sprzętem przenośnym lepsze właściwości mają układy z pełnomostkowym stopniem wyjściowym zamiast półmostkowym, gdyż lepiej wykorzystują pojedyncze napięcie zasilające. Wadą jest dwukrotnie wyższa rezystancja R_{DS} , na drodze sygnału, co wymusza staranniejszy dobór tranzystorów mocy MOS.

Dlatego jeśli zostanie zastosowane obciążenie 8Ω , a $R_{DS1} + R_{DS2} = 1 \Omega$, sprawność spadnie do około 90%.

Układ ADAU1590 wykorzystuje P-kanalowe tranzystory na górnej stronie mostka, zamiast typowego układu opartego wyłącznie na elementach N-kanalowych na górze i dole. Ułatwia to sterowanie górnymi tranzystorami i konstrukcję drivera gdyż napięcie na bramce górnego MOSFET-a zawiera się zawsze w przedziale $V_{GS}(th) + V_{DD}$. Dole i górne tranzystory są tego samego typu, mają identyczne charakterystyki i sparowaną rezystancję R_{DS} , co zapewnia symetryczne przełączanie.

Elementy N-kanalowe w górnej części układu mostkowego wymagają napięcia na bramce przekraczającego wartość napięcia zasilającego, gdyż źródło tranzystora jest połączone z zaciskiem wyjściowym $V_{GS}(on) = V_{GS}(th) + V_{OUT}$. Zapewnienie poprawnego sterowania wymaga wbudowania układu przesuwnika napięcia, oddzielnej szyny zasilania lub układu bootstrapu. W przypadku dolnej strony mostka tranzystory N-kanalowe nie sprawiają kłopotów, gdyż napięcie sterujące na bramce zawiera się w zakresie napięcia zasilania.

Filtr wyjściowy

Filtry wyjściowe są zwykle wykonywane jako Butterwortha drugiego rzędu. Większe rzędy mogą być także implementowane, niemniej ich przydatność pojawia się w układach korzystających z sygnału zegarowego o niskiej częstotliwości, wymagającego ostrej kolanowej charakterystyki odcięcia wyższych harmonicznych takich, które mogą być źródłem przykrych szumów słyszalnych w paśmie akustycznym.

Dostępne techniki kształtowania szumów w sygnale wyjściowym w połączeniu z sygnałem zegarowym o wysokiej częstotliwości i kształcie trójkątnym zboczy pozwalają w wielu aplikacjach zrezygnować z filtra wyjściowego, co jest stosowane w wielu komercyjnych i przemysłowych systemach. Bezfiltryne wzmacniacze klasy D wymagają realizacji krótkich połączeń pomiędzy wzmacniaczem a głośnikiem i są zoptymalizowane do sterowania indukcyjnością głośnika.

Transformata Laplace'a dla filtra Butterwortha drugiego rzędu jest równa:

$$H(s) = \frac{1}{1 + s^2 + s \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{s^2 \cdot s \cdot \frac{1}{R \cdot C} + \frac{1}{L \cdot C}}$$

Dla układu ze stopniem pełnomostkowym:

$$C = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{2} \cdot R} \quad \& \quad L = \frac{1}{2 \cdot \omega} \cdot \sqrt{2} \cdot R$$

Klasa D będzie miała 3-decybelową wartość częstotliwości:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot L \cdot C}$$

Sprawność

Suma rezystancji R_{DS} dla obu tranzystorów plus ESR dla wyjściowej indukcyjności filtra drugiego rzędu Butterwortha określa sprawność wzmacniacza klasy D:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{P \cdot R_L}{P^2 \cdot [2 \cdot (R_{DS(on)} + R_{IND}) + R_L]}$$

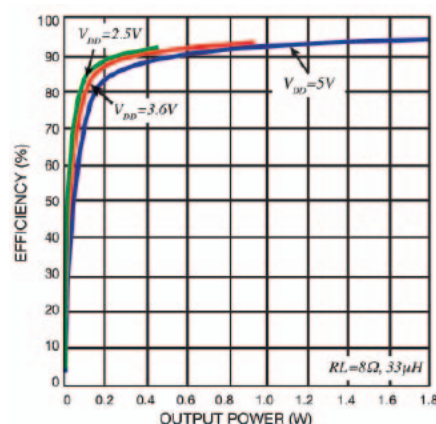
Podsumowanie

Zintegrowane rozwiązania wzmacniaczy mocy audio klasy D są jeszcze w początkowym stadium rozwoju rynkowego. Projektanci, którzy za ich pomocą chcieliby uzyskać parametry reprodukcji sygnału sięgające standardów audiofilskich, mogą być zmuszeni do korzystania z istniejących rozwiązań pracujących w klasie AB lub korzystania z rozwiązań bazujących na elementach dyskretnych. Z kolei konstruktorzy, którzy szukają rozwiązań charakteryzujących się wysoką sprawnością takich, które zasilane są z baterii lub muszą zostać umieszczone w niewielkiej obudowie, jak na przykład płaskie telewizory, mogą wśród rozwiązań zintegrowanych znaleźć preferowane układy wzmacniaczy klasy D dla zakresu mocy wyjściowych poniżej 10 W.

Rozwiązania zawierające głośnik umieszczony w bezpośrednim sąsiedztwie wzmacniacza są w stanie poprawić sprawność poprzez eliminację filtra wyjściowego i dobre dopasowanie do indywidualnej charakterystyki głośnika. Zaawansowane techniki kształtowania szumów, korzystające ze sprzężenia zwrotnego, są w stanie poprawić wartość THD nawet do wartości zbliżonych do tego, co oferują dzisiaj układy klasy AB.

Więcej informacji na temat nowości elektronicznych do zastosowań w multimediami można znaleźć w magazynach Technology First „Inside the mindset of multimedia” i Select publikowanych przez Farnell. Magazyny dostępne są na stronie internetowej www.farnell.com/pl w sekcji „Publikacje”.

John Siviter
Farnell Technical Support Team



Rys. 1. Sprawność w funkcji mocy wyjściowej typowego SoC klasy D