

Wzmacniacze operacyjne

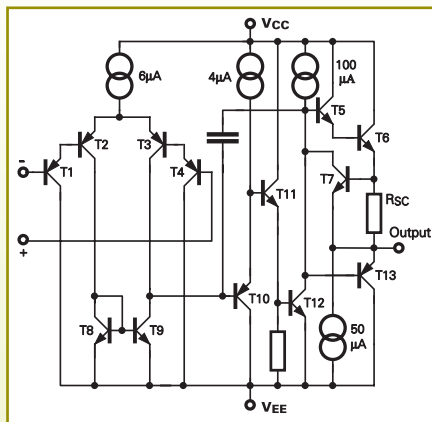
Odcinek 3

Kolejny odcinek serii przynosi bliższe informacje o cechach charakterystycznych najpopularniejszych wzmacniaczy, wynikających z ich budowy wewnętrznej.

Układy LM358, LM324 wykonane są w technologii bipolarnej, czyli składają się w istocie ze "zwykłych" tranzystorów. Jeden wzmacniacz pobiera około 1mA prądu z zasilacza. Wydajność prądowa wyjścia wynosi kilkanaście mA. **Rysunek 21** pokazuje ich budowę wewnętrzną. Zwróć uwagę na kierunek przepływu stałego prądu wejściowego (polaryzującego) - prąd baz tranzystorów wejściowych (PNP) wypływa z wyjść. Wzmocniacze te mają stosunkowo duży prąd polaryzacji wejścia, rzędu 0,04uA. To jest wbrew pozorom dość dużo. W poprzednim odcinku dowiedziałeś się, że wzmocnienie wyznaczone jest przez stosunek rezystorów sprzężenia zwrotnego. Tu masz pierwszy powód, dla którego przy większych prądach polaryzacji te rezystory nie mogą mieć zbyt dużych wartości (praktycznie do 100kΩ...1M). Przy dużej wartości rezystorów okazałoby się, że nie możemy pominąć prądu polaryzacji wejść, którego wartość byłaby porównywalna z prądami płynącymi w rezystorach. Wcześniej wyliczenia i wzory nie byłyby prawdziwe, ponieważ przy ich wyprowadzaniu zakładaliśmy, że prądy wejściowe są pomijalnie małe.

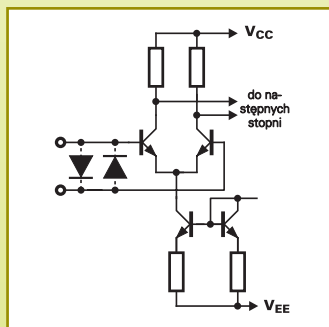
Wielką zaletą układów LM358, 324 jest fakt, że mogą poprawnie pracować przy (wspólnym) napięciu wejściowym zbliżonym do ujemnego napięcia zasilania, a nawet 0,2V poniżej (tak!) ujemnego bieguna zasilania - i to jest bardzo cenna zaleta w układach zasilanych pojedynczym napięciem - bo wzmacniacze operacyjne często zasilamy pojedynczym napięciem, a nie symetrycznie. Na razie nie musisz rozumieć szczegółów - zapamiętaj, że kostki te mają taką pożyteczną właściwość, wynikającą z budowy obwodów wejściowych i obecności tranzystorów PNP na wejściach (**rys. 21**).

Układy NE5532 i LM833 mają na wejściu tranzystory NPN (**rysunek 22**) i co istotniejsze - węższy zakres dopuszczalnych napięć



Rys. 21.

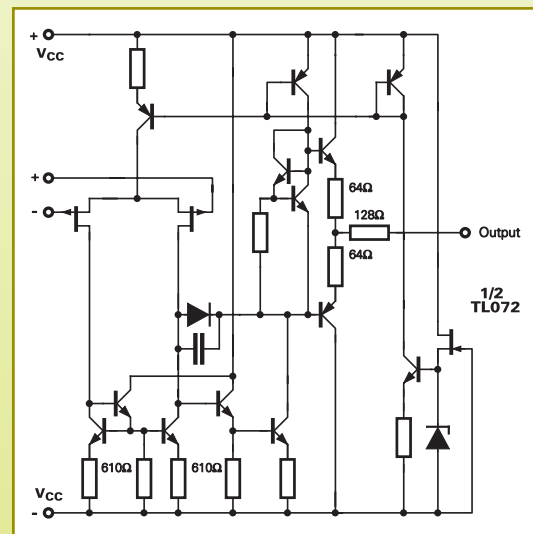
wspólnych. Pobierają też w spoczynku więcej prądu, około 4...5mA. Ale za to mają zdecydowanie mniejsze szumy i są przeznaczone do niskoszumnych układów audio. Układ NE5532 ma ponadto zwiększoną wydajność prądową wyjścia i jako jeden z nielicznych dodatkowo dwie włączone przeciwobnie-równolegle diody na wejściu (na rysunku 22 zaznaczone linią przerywaną), ale to nie przeszkadza, bo



Rys. 22.

w sprzęcie audio zawsze pracuje w zakresie liniowym, gdy napięcia na obu wejściach są równe (wirtualne zwarcie), a nigdy tak, jak na rysunku 8.

Rysunek 23 pokazuje schemat wewnętrzny układów rodziny TL06X, 7X, 8X). Nieco inny schemat wewnętrzny mają układy LF357 (LF355, 357). W każdym razie wszystkie mają na wejściach tranzystory polowe złączowe FET. W rezultacie wejściowy prąd polaryzujący wynosi w temperaturze pokojowej typowo 30pA (tak, tylko 0,03nA = 0,00003uA), który dopiero przy temperaturze struktury +100°C rośnie do około 10nA. Prądy wejściowe rzędu pikoamperów bez obaw można w większości przypadków zaniedbać (sprawdź sam, jaki spadek napięcia wywoła prąd 30pA na rezystorze 10kΩ). Ponadto obecność tranzystorów FET na wejściach umożliwia pracę w zakresie napięć wspólnych, zbliżonych do dodatniego napięcia zasilania - i to jest też cecha godna uwagi



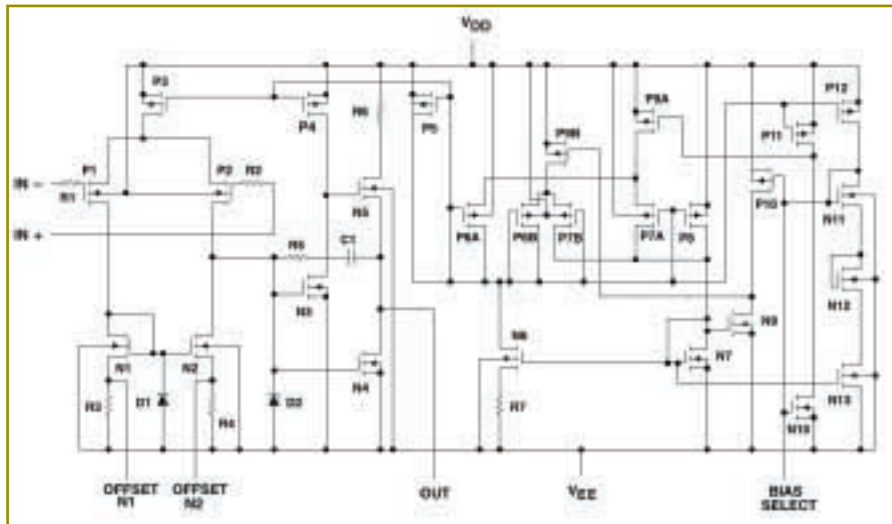
Rys. 23.

- wykorzystuje się ją, choć nie tak często jak jej odpowiednik, w kostkach LM358, LM324. Układy TL081, TL082, TL084, LF356 należą do "standardowych". TL071, TL072, TL074 to układy niskoszumne. Wszystkie pobierają około 1,5mA prądu zasilania, mają wydajność wyjścia kilkanaście mA, są szybkie, znacznie szybsze niż LM358, LM324. Natomiast TL061, TL062, TL064 są wprawdzie wolniejsze (ale i tak szybsze od LM358, 324), pobierają za to tylko 0,2mA prądu zasilania.

Do układów audio, gdzie sygnały mają wartość powyżej 100mV, możesz śmiało używać kostek TL07X, TL08X, LF356. W układach, gdzie sygnały są mniejsze, stosuj TL07X i jeszcze lepsze NE5532, LM833. Rezystancje w pętli sprzężenia zwrotnego we wzmacniaczach audio nie powinny być większe niż 100kΩ, a wzmocnienie nie powinno być większe niż 100x (40dB).

Wszystkie wymienione układy mogą śmiało pracować przy napięciu zasilającym do 30V ($\pm 15V$). Najniższe napięcie zasilania zalecane dla kostek TL0XX, LF356, NE5532, LM833 to według katalogu 10V ($\pm 5V$), ale w rzeczywistości mogą one pracować przy napięciu jeszcze trochę niższym. Natomiast układy LM358, LM324 mogą pracować przy znacznie niższych napięciach zasilania: według katalogu do 5V ($\pm 2,5V$), w praktyce jeszcze trochę niższych - i to jest ich kolejna istotna zaleta. Co prawda zmniejsza się wtedy użyteczny zakres napięć wejściowych i wyjściowych, ale w niektórych sytuacjach zastosowanie tanich LM-ów jest jedynym prostym wyjściem.

Kostka TLC271 to wzmacniacz wykonany w technologii CMOS (rysunek 24), a do tego programowany. Dopuszczalny zakres napięć zasilających wynosi 3...16V ($\pm 1,5... \pm 8V$), co od biedy umożliwia zasilanie z baterii 3V (napięcie zużytej baterii jest niższe od 3V, ale układ powinien pracować też przy 2,5V). Bardzo podobny (programowany w ten sam sposób - patrz uwagi w tabeli 2) układ ICL7611 może być według katalogu zasilany napięciem niższym niż napięciem, już od 2V ($\pm 1V$). Wejścia CMOS obu układów mogą pracować przy napięciu wspólnym równym ujemnemu napięciu zasilania (a nawet 0,2V niżej). Prąd wejściowy w temperaturze pokojowej wynosi tylko 1pA (!), a przy $+70^{\circ}C$ rośnie do około 50pA. Nóżka nr 8 tej kostki decyduje o właściwościach: gdy jest zwarta do minusa zasilania, układ jest mniej więcej tak szybki jak LM358, 324 i pobiera z zasilacza ok. 1mA prądu. Gdy nóżka 8 dołączona jest do napięcia równego połowie napięcia zasilania, układ staje się wolniejszy i raczej nie nadaje się do układów audio, ale pobiera tylko 0,15mA prądu. Zwarcie nóżki 8 do plusa zasilania czyni układ jeszcze wolniejszym (częstotliwości pracy do 1kHz), ale za to pobór prądu wynosi tylko około 15uA! Dla każdego coś miłego! Tylko trzeba pamiętać, że wraz z poborem prądu radykalnie zmniejsza



Rys. 24.

się także szybkość wzmacniacza i wydajność prądowa wyjścia.

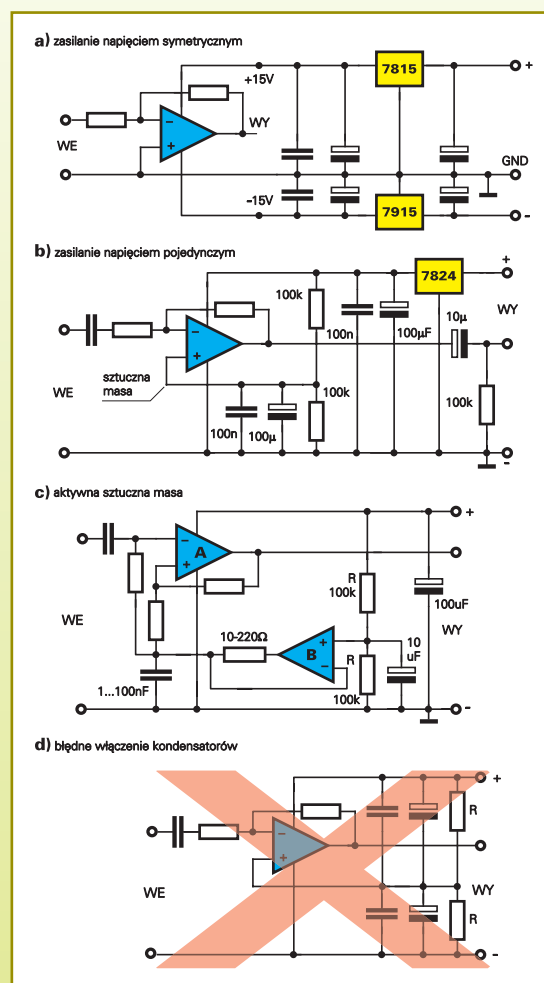
Wskazówki praktyczne

Jak się przekonałeś, kilka wymienionych właśnie kostek pokrywa prawie wszystkie typowe potrzeby. Ja osobiście najczęściej stosuję kostki TL08X (lub lepiej TL07X; są w tej samej cenie), bo są szybkie i mają pomijalnie małe prądy polaryzacji wejść. Do układów zasilanych pojedynczym (niższym) napięciem stosuję LM358 lub LM324. Tylko w uzasadnionych przypadkach trzeba sięgnąć do innych układów, na przykład precyzyjnych, bardzo szybkich, o jeszcze niższym napięciu zasilania, itp. Wymaga to jednak nie tylko sporej wiedzy o dostępnych kostkach, ale przede wszystkim ogólnego doświadczenia. Ty na razie zacznij od wymienionych kostek i nie porywaj się na superniskoszumne, superszybkie czy superprecyzyjne konstrukcje. To naprawdę wymaga doświadczenia.

I jeszcze słowo o starej, dostępnej w sklepach kostce uA741 (= LM741, ULY7741). Ma ona właściwości zbliżone do LM358, 324, ale obwody wejściowe, z grubsza biorąc, są zbudowane według rysunku 22, i zakres wspólnych napięć wejściowych jest węższy (nie obejmuje ani ujemnego, ani dodatniego napięcia zasilania).

Ponadto kostka nie może pracować przy napięciach zasilania niższych niż 8...10V ($\pm 4... \pm 5V$). Jeśli masz ją za darmo - stosuj śmiało,

ale jeśli masz kupić - kup jedną z wcześniej wymienionych. To samo dotyczy układu LM301 (krajowy odpowiednik ULY7701). Jest to dość przyzwoita kostka starszej generacji (parametry porównywalne z TL081),



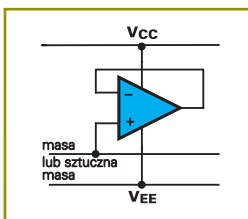
Rys 25.

ale wymaga dołączenia jednego kondensatora (4,7...30pF) do nóżek 1, 8, by się nie wzbudzała. Jeśli masz za darmo - stosuj.

Kilka razy wspominałem o zasilaniu wzmacniaczy operacyjnych pojedynczym napięciem. Stosujemy to dość często i najczęściej (przede wszystkim w układach audio) chodzi o wytworzenie napięcia stałego, odpowiednio polaryzującego wejścia wzmacniaczy operacyjnych. Po prostu trzeba wtedy stworzyć obwód sztucznej masy, by napięcie wspólne na wejściach wzmacniacza operacyjnego wynosiło około połowy napięcia zasilania. Tym samym sztuczna masa ma znaczenie przede wszystkim dla prądów stałych. Natomiast dla przebiegów zmiennych w rzeczywistości masa jest ujemny biegun zasilania. Rysunki 25a oraz 25b pokazują sposoby realizacji takiego samego wzmacniacza przy podwójnym i pojedynczym zasilaniu. W układzie z rysunku 25b sztuczna masa wytwarza się przy pomocy dwóch jednakowych rezystorów. Wartość tych rezystorów należy ustalić w zależności od prądów, które płyną w obwodzie sztucznej masy. W układzie z rysunku 25b w obwodzie masy płynie jedynie znikomo mały prąd polaryzacji jednego wejścia wzmacniacza operacyjnego. Wartość rezystorów może wtedy wynosić nawet 100kΩ...1MΩ. Gdyby prądy w obwodzie sztucznej masy były większe, wartość rezystorów powinna być mniejsza, by prąd przez nie płynący był kilkadziesiąt razy większy, niż prądy w obwodzie masy. Zwróć uwagę, że stosując obwód sztucznej masy, musimy odpowiednio dołączyć kondensatory filtrujące. Chodzi o to, by napięcie tej sztucznej masy było zwarte dla przebiegów zmiennych z ujemnym biegunem zasilania. Zwarcie to (inaczej mówiąc - skuteczną filtrację) zapewnia jeden lub dwa kondensatory. Na rysunku 25b pokazano po dwa kondensatory: duży elektrolit (10...1000μF) i mały ceramiczny "lizaczek" (100nF). Reaktancja pojemnościowa kondensatora elektrolitycznego przy najmniejszej częstotliwości użytecznej powinna być co najmniej kilkanaście lub kilkadziesiąt razy mniejsza od rezystancji R dzielnika. Gdy w obwodzie sztucznej masy płyną prądy rzędu 1mA lub większe, rezystory R musiałyby mieć wartość małą, a kondensatory filtrujące - dużą. W takich przypadkach często stosuje się obwód sztucznej masy z dodatkowym wzmacniaczem operacyjnym według rysunku 25c. Wtórnik B ma bardzo małą rezystancję wyjściową, znacznie mniejszą niż 1Ω, dlatego skutecznie zastępuje duże elektrolity w zakresie małych częstotliwości. Można dodatkowo włączyć mały ceramiczny "lizaczek", który odfiltruje zakłócenia o wysokiej częstotliwości. Rezystor dziwnie włączony na wyjściu wzmacniacza operacyjnego B nie zawsze jest konieczny, jednak niektóre wzmacniacze mają

tendencję do samowzbudzania przy obciążeniu pojemnościowym.

W rzeczywistych układach nie zawsze stosuje się stabilizatory napięcia zasilania. W rezultacie między szynami zasilania występują mniejsze lub większe "śmieciki", w postaci różnych przebiegów zmiennych, zwłaszcza szumów i tętnień (przydźwięku sieci). Jeśli kondensatory są włączone wg rysunku 25b, zakłócenia te nie przejdą na wyjście. Natomiast w przypadku błędnego włączenia kondensatorów według rysunku 25d, kondensatory tworzą dzielnik; w obwodzie sztucznej masy "śmieciki" są tylko o połowę mniejsze niż na dodatniej szynie zasilania i przenoszą się na wyjście. Jest to bardzo istotna sprawa, o której nie można zapomnieć, zwłaszcza w sprzęcie audio i pomiarowym.



Rys. 26.

Dobrym zwyczajem jest podłączanie nie wykorzystanych wzmacniaczy z podwójnych czy poczwórnych kostek, najczęściej według rysunku 26. Wtedy wejścia nie wiszą w powietrzu i na wyjściu nie powstaną oscylacje.

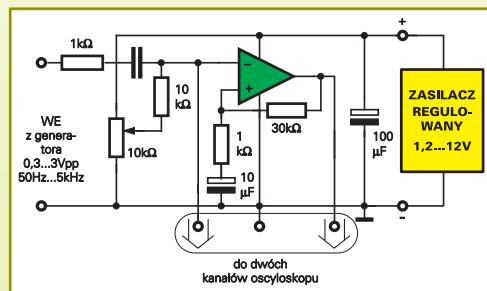
Czas najwyższy, byś uzbrojony w podstawowe informacje zaczął swą przygodę ze wzmacniaczami operacyjnymi. Zaczynaj więc! Przeanalizuj przykłady zastosowania wzmacniaczy operacyjnych, choćby w poprzednich numerach EdW. Spróbuj samodzielnie zbudować kilka układów opisanych w pierwszym odcinku cyklu. Możesz do tego wykorzystać płytkę uniwersalną z wylutowaną podstawką. Choć na razie nie omawialiśmy wszystkich parametrów zawartych w tabeli 2, już teraz możesz śmiało z niej korzystać. Zdobądź odpowiednie kostki i buduj układy, czy to według schematów z literatury, czy według własnych projektów. Firma AVT niebawem wprowadzi do swej oferty kolejny zestaw startowy zawierający najpotrzebniejsze wzmacniacze operacyjne.

Ćwiczenia obowiązkowe

Bardzo mocno zachęcam Cię, żebyś zestawiał układ pomiarowy, a właściwie prościutki wzmacniacz według rysunku 27 i osobiście przekonał się, jaki jest wyjściowy zakres napięć wspólnych oraz zakres napięć uzyskiwanych na wyjściu wszystkich najpopularniejszych wzmacniaczy i koniecznie przy różnych napięciach zasilania. Choć wymaga to sporo czasu, uzyskasz bezcenne informacje - poznasz nie tylko użyteczny zakres napięć wejściowych i wyjściowych, ale także sprawdzisz, przy jakim minimalnym napięciu zasilania

mogą pracować poszczególne kostki. Podawaj na wejście jakikolwiek sygnał zmienny (300mVpp...2Vpp, 50Hz...5kHz) i obserwuj przebieg na wyjściu, przy zmianach położenia suwaka potencjometru ustalającego poziom napięć wspólnych na wejściu. Przy ustawieniu potencjometru w położeniu środkowym zbadasz zakres napięć wyjściowych, czyli poznasz, jakie są napięcia nasycenia: dodatnie i ujemne (zazwyczaj nie są równe). Przesuwając suwak potencjometru w stronę dodatniej, a potem ujemnej szyny zasilania, zbadasz użyteczny zakres (wspólnych) napięć wejściowych. W trakcie tych pomiarów dobrze byłoby użyć oscyloskopu dwukanałowego. Kanały oscyloskopu powinny być sprzężone stałoprądowo, byś odczytał wartości napięć wprost z ekranu. Pobaw się trochę, zmniejsz zmienne napięcie wejściowe i dokładnie zbadaj właściwości kostek także przy skrajnie małych napięciach zasilania. Będziesz zdziwiony, przy jakich niskich napięciach jeszcze pracują.

Przy wyjściu poza zakres dopuszczalnych napięć wejściowych (potencjometr w skrajnych położeniach) w niektórych kostkach najprawdopodobniej zaobserwujesz zjawisko inwersji. Wejście nieodwracające poza zakresem dopuszczalnych napięć wejściowych zacznie działać jak odwracające (poznasz to po fazie sygnału wyjściowego). Układowi scalonemu nic się nie stanie (celowo dodałem szeregowy rezystor ochronny 1kΩ na wejściu), ale działanie będzie błędne. Przekonaj się sam, bo to są bezcenne informacje, z których nie zdaje sobie sprawy wielu amatorów.



Rys. 27.

Nie zlekceważ tego ćwiczenia - jeśli chcesz poważnie zajmować się wzmacniaczami operacyjnymi, stosować je w różnych nietypowych układach i przy małych napięciach zasilania, dokładnie przebadaj wszystkie posiadane wzmacniacze i zapisz wnioski. Przydadzą Ci się w przyszłości.

I tyle w tym odcinku. W następnych podam Ci szereg dalszych interesujących możliwości wykorzystania wzmacniaczy operacyjnych. Zajmiemy się także szczegółowo innymi właściwościami i parametrami wzmacniaczy.

Piotr Górecki