

W poprzednim numerze EP opublikowaliśmy opis modułu analogowego procesora audio.

Kontynuując tematykę audio przedstawiamy kolejny „klocek”

- uniwersalny układ komparatora.

W wersji podstawowej moduł jest dwukanałowym wzmacniaczem-ogranicznikiem o wzmacnieniu regulowanym napięciem stałym i jest przeznaczony przede wszystkim do systemów nagłośnienia.

Znajdzie też wiele zastosowań jako blok automatycznej regulacji wzmacnienia o bardzo wysokich parametrach.

Jako kompresor będzie cennym uzupełnieniem systemu elektroakustycznego w samochodzie - zmniejszając dynamikę audycji muzycznych podniesie poziom najcichszych fragmentów powyżej poziomu hałasu panującego we wnętrzu samochodu.

Jako ekspander może być użyteczny przy odczycie starszych, zasumionych taśm.

W wersji z przełączaniem kompresor/ekspander można go wykorzystać jako komplementarny układ redukcji szumów dbx w magnetofonie.

Uniwersalny komparator audio, część 1

kit AVT-180

Dokładny opis samego układu scalonego pozwoli wielu Czytelnikom zrealizować własne pomysły: np. układ dynamicznej redukcji szumów (odpowiednik DNL), wysokiej jakości bramkę szumu, różnorodne wzmacniacze sterowane napięciem, filtry o częstotliwościach charakterystycznych regulowanych napięciem itd.

W ofercie firmy Philips znajdziemy co najmniej kilka kostek pełniących funkcję komparatora (KOMPresor-ekspANDOR). Układy NE570/571 przeznaczone są zasadniczo do systemów telekomunikacyjnych; ich wadą jest znaczący poziom szumów własnych, a co gorsza, właściwości dynamiczne bloku regulacji wzmacnienia ustalone są jednym obwodem RC i nie ma prostej możliwości niezależnego ustalenia czasu ataku/opadania. Układy NE575/576 są bardzo dobrymi, energooszczędnymi, ale w pewnym sensie specjalizowanymi układami o ściśle określonym przeznaczeniu. Układ NE572 jest

najbardziej elastyczny, ma najlepsze parametry i - co nie mniej ważne - jest dostępny na naszym rynku za przystępną cenę. Wszystkie wspomniane układy mają jednakową zasadę działania, różnią się szczegółami.

Prezentowany dziś układ komparatora jest wykonany w oparciu o układ scalony NE572. Ponieważ układ ten ma bardzo dobre parametry i szeroki zakres zastosowań, więc przedstawiamy jego szczegółowy opis. Nasi czytelnicy będą mogli go wykorzystać w wielu samodzielnych opracowaniach.

Układ scalony NE572

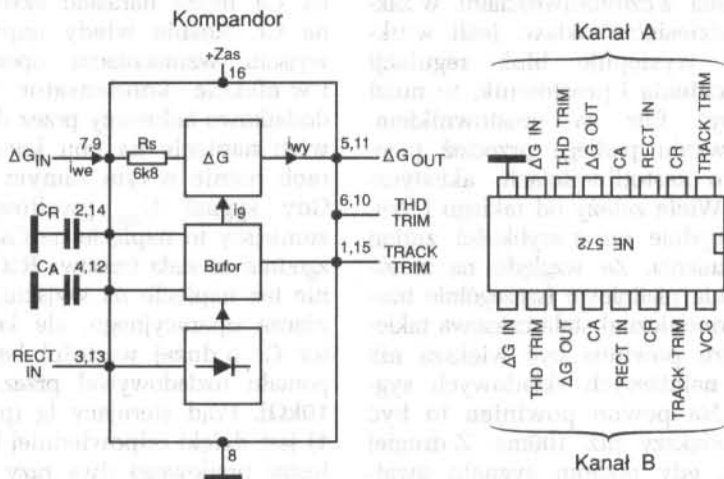
Układ ma dwa identyczne kanały, z których każdy składa się z trzech zasadniczych bloków:

- komórki o zmiennym wzmacnieniu (gain cell),
- prostownika dwupołówkowego,
- bufora.

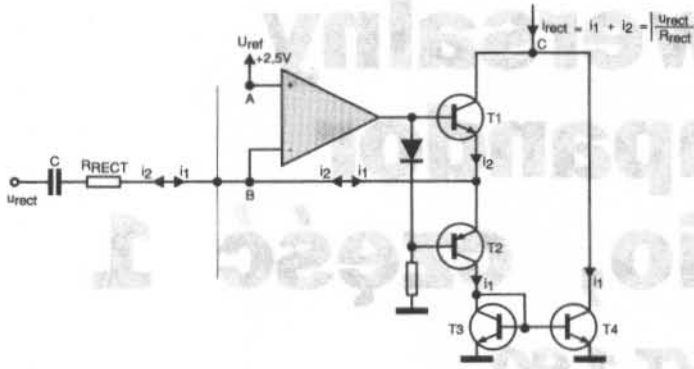
Schemat blokowy pokazano na rysunku 1. Kostka jest zasilana jednym dodatnim napięciem. W praktycznych układach wymagane jest dołączenie kilku zewnętrznych elementów biernych i niskoszumnego wzmacniacza operacyjnego, który może być zasilany unipolarnie lub bipolarnie.

Komórka o zmiennym wzmacnieniu

Jest to dwucierwkowy układ mnożący dwukierunkowy prąd wejściowy Iwe oraz prąd sterujący Ig. Budowa wewnętrzna jest dość skomplikowana - występują tu źródła prądowe, wzmacniacz operacyjny, dwie pary różnicowe tranzystorów NPN, źródło napięcia odniesienia 2,5V. Wewnątrz umieszczono też rezystor szeregowy Rs o wartości ok. 6,8kΩ. Zainteresowanych szczegółami odsyłamy do katalogu, dla prakty-



Rys. 1. Schemat blokowy i rysunek wyprowadzeń układu NE572



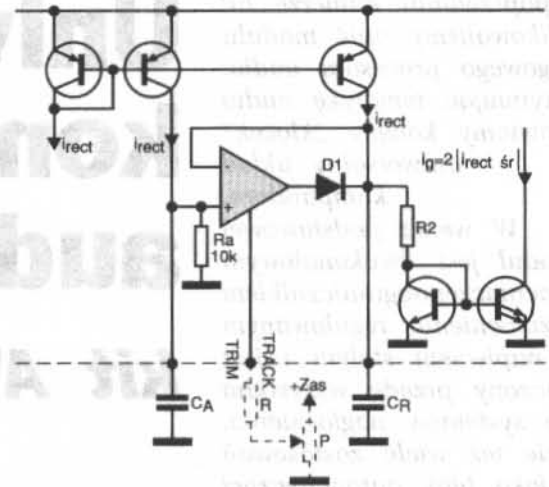
Rys. 2. Poglądowy schemat prostownika

ków najistotniejszy jest fakt, że blok ten możemy z powodzeniem wyobrazić sobie jako rezystancję sterowaną prądem I_g . Można tak uprościć problem, nie można jednak zapomnieć przy tym o trzech ważnych sprawach:

- prąd końcówek wejściowych (7, 9) nie może przekroczyć wartości $\pm 140\mu A$, bo pojawią się duże zniekształcenia,
- końcówki wejściowe i wyjściowe (7, 9, 5, 11, 3, 13) są zawsze na potencjale ok $+2,5V$ względem masy,
- układ jest obliczony (i wykonany) na minimum zniekształceń nieliniowych, ale kto chciałby dodatkowo poeksperymentować, może spróbować podać na końcówki 7, 9, 6, 10 prądy w obu kierunkach o wartości kilku...kilkunastu mikroamperów.

Prostownik

Zasadę działania dwupołkowego prostownika omówimy szerzej, bowiem idea jest ciekawa i może być wykorzystana przy innych okazjach. Poglądowy schemat prostownika znajdziemy na **rysunku 2**. Nieodwracające wejście wzmacniacza operacyjnego jest polaryzowane napięciem $2,5V$. Gdy na wejściu RECT IN pojawi się rosnące napięcie dodatnie, wtedy popłynie prąd i_1 przez rezystor R_{rect} . Spowoduje to obniżenie napięcia na wyjściu wzmacniacza operacyjnego i bazie tranzystora T2. Prąd i_1 popłynie do masy przez T2 i T3. Z zasady działania wzmacniacza operacyjnego napięcia na jego obu wejściach (punkty A, B) będą równe. Jednocześnie, ponieważ jednakowe tranzystory T3 i T4 są połączone w układzie zwierciadła prądowego, w kolektorze T4 popłynie prąd równy prądowi i_1 . Gdy na wejściu RECT IN pojawi się ujemny sygnał malejący, to



Rys. 3. Poglądowy schemat bufora

popłynie prąd i_2 . Napięcie na bazie T1 wzrośnie, T1 otworzy się na tyle, że dostarczy prądu równego i_2 , aby napięcia w punktach A, B były równe. Ponieważ kolektory tranzystorów T1 i T4 są połączone, więc w punkcie C otrzymamy wyprostowany, jednokierunkowy prąd o wartości $i_{rect} = u_{rect} / R_{rect}$.

W rzeczywistości układ jest nieco bardziej skomplikowany i występuje dodatkowe ważne ograniczenie: szczytowa wartość prądów i_1, i_2 nie powinna przekroczyć wartości $300\mu A$, w przeciwnym razie pojawią się zniekształcenia i wzbudzenia. Warto wiedzieć, że wejściowy prąd polaryzujący wejść wzmacniacza operacyjnego wynosi typowo $70nA$. Pasma przenoszenia takiego układu prostownika zależy od poziomu sygnału wejściowego i dla większych sygnałów przekracza $1MHz$.

Bufor

W urządzeniach elektroakustycznych wysokiej klasy mamy do czynienia z częstotliwościami w zakresie dziesięciu oktaw. Jeśli w układzie występuje blok regulacji wzmocnienia i prostownik, to musi też być filtr za prostownikiem. Prostowaniu podlega przecież przebieg o częstotliwościach akustycznych. Wiele zależy od takiego filtru, bo decyduje on o szybkości zmian wzmocnienia. Ze względu na zniekształcenia nieliniowe (szczególnie trzecią harmoniczną) stała czasowa takiego filtru powinna być większa niż okres najniższych składowych sygnału. Na pewno powinien to być czas większy niż $100ms$. Z drugiej strony, gdy poziom sygnału gwałtownie narasta (po angielsku określa się to: burst = wybuch), wtedy

chcielibyśmy, aby układ szybko reagował i np. szybko zmniejszył wzmocnienie. Czas reakcji nie powinien przekroczyć kilkudziesięciu milisekund. We wspomnianych tańszych układach NE570/571, przeznaczonych dla telekomunikacji (pasmo $300...3400Hz$), przewidziana jest tylko jedna stała czasowa. W NE572 wprowadzono specjalny blok - właśnie omawiany bufor - aby niezależnie dobrać według potrzeb obie stałe czasowe: ataku (ang. - attack time) i opadania (powrotu, ang. recovery time). **Rysunek 3** pokazuje w uproszczeniu zasadę działania tego stopnia. Wyprostowany przebieg w postaci prądu I_{rect} przechodzi przez zwierciadło prądowe i powoduje ładowanie pojemności C_a . Pojemność C_a , wewnętrzny rezystor R_a ($10k\Omega$) i prąd I_{rect} określają czas ataku. Typowo używa się tu pojemności $0,1...1\mu F$, co daje odpowiednio $4...40ms$. Pojemność C_r jest oczywiście większa od C_a , więc napięcie na C_a może narastać szybciej niż na C_r . Rośnie wtedy napięcie na wyjściu wzmacniacza operacyjnego i w efekcie kondensator C_r jest dodatkowo ładowany przez diodę D1, więc napięcie na obu kondensatorach rośnie w tym samym tempie. Gdy sygnał U_{rect} gwałtownie się zmniejszy to napięcie na C_a spadnie zgodnie ze stałą czasową R_1C_a . Spadnie też napięcie na wyjściu wzmacniacza operacyjnego, ale kondensator C_r o dużej wartości będzie się pomalutku rozładowywał przez R2 (też $10k\Omega$). Prąd sterujący I_g (patrz rys. 1) jest dzięki odpowiedniej budowie lustra prądowego dwa razy większy od prądu płynącego przez R2. Typowa wartość pojemności C_r wy-

Podstawowe parametry układu scalonego NE572

Napięcie zasilania: +6...+22V
 Pobór prądu: max. 6mA
 Wewnętrzne napięcie odniesienia: 2,5 ±0,2V
 Zniekształcenia nieliniowe: bez kompensacji typ. 0,2%, max. 1% z kompensacją typ. 0,05%
 Napięcie szumów własnych w ukł. ekspandora: typ. 6µV, max. 25µV
 Tłumienie przesłuchu międzykanałowego: min. 60dB
 Tłumienie tętnień zasilania: typ. 70dB
 Zakres temperatur otoczenia w czasie pracy: 0...+70°C

nosi 10µF, co daje czas opadania 400ms. Obie pojemności można zmieniać w szerokich granicach, według indywidualnych potrzeb.

Każdy bufor ma wyprowadzoną końcówkę TRACK TRIM (1, 15), co pozwala uzyskać współbieżną regulację torów także przy najmniejszych amplitudach sygnałów - ma to znaczenie w wysokiej jakości sprzęcie stereo. Dla ewentualnej korekcji należy dołączyć prosty układ (na rysunku 3 zaznaczony linią przerywaną) - chodzi tu o dostarczenie do końcówek 1, 15 prądu w zakresie ±3µA.

Na końcówkach 6, 10 występuje napięcie odniesienia 2,5V, końcówki te w analogiczny sposób, jak przed chwilą opisano, można wykorzystać do kompensacji (korekcji) zniekształceń nieliniowych w sprzęcie wysokiej klasy.

Projektowanie układów komparatorowych

Omówimy teraz niektóre wzory matematyczne. Wiemy, że wielu naszych Czytelników nie znosi wzorów i podane w katalogu zależności matematyczne dotyczące układu NE572 mogą ich przestraszyć. Objasnijmy więc jak najbardziej przystępnie najważniejsze wzory.

Mówiliśmy, że komórka o zmiennym wzmocnieniu (gain cell) jest w rzeczywistości układem mnożącym. Jej funkcja przenoszenia wyrażona jest wzorem (patrz też rys. 1):

$$i_{wy} = i_{we} \cdot \frac{I_g}{140\mu A} \quad (1)$$

Prąd wejściowy i wyjściowy może być dodatni lub ujemny - tu

rozpatrujemy wartości chwilowe. Prąd I_g to prąd sterujący wytworzony przez wyprostowanie i uśrednienie przebiegu zmiennego podanego na wejście RECT IN. W praktycznych układach pracy końcówki wyjściowe 5 i 11 zawsze dołączone są do odwracającego wejścia zewnętrznego wzmacniacza operacyjnego, inaczej mówiąc do masy pozornej (punkty te są wprowadzicie na potencjale +2,5V względem masy, ale rozpatrujemy działanie dla przebiegów zmiennych). Choć nie wynika to wprost z przedstawionych danych, możemy obie strony równania podzielić przez u_{we} i po przekształceniach otrzymamy:

$$R_{zst} = R_s \cdot \frac{140\mu A}{I_g} \quad (2)$$

Widzimy tu, że zastępcza „rezystancja” ściśle zależy od prądu sterującego I_g , czyli w sumie od napięcia na wejściu RECT IN. Spójrzmy teraz na **rysunki 4 i 5**. Przedstawiono na nich szereg możliwości regulacji wzmocnienia za pomocą napięcia, prądu lub rezystancji. Jest to pierwsza, najprostsza możliwość wykorzystania układu NE572. Nie wszyst-

kie pokazane warianty warto stosować w praktyce, chodzi tylko o pokazanie, że przy wielu różnych sposobach sterowania uzyskamy efekt regulacji wzmocnienia, choć charakterystyki regulacji będą odmienne. Sposoby pokazane na rysunkach a) i b) dadzą ten sam efekt, bo rezystor dołączony jest przecież do wejścia prostownika, gdzie występuje napięcie stałe +2,5V. Wzmocnienie układów wzmacniacza odwracającego z rysunków 4 i 5 wynosi:

$$K_u = \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

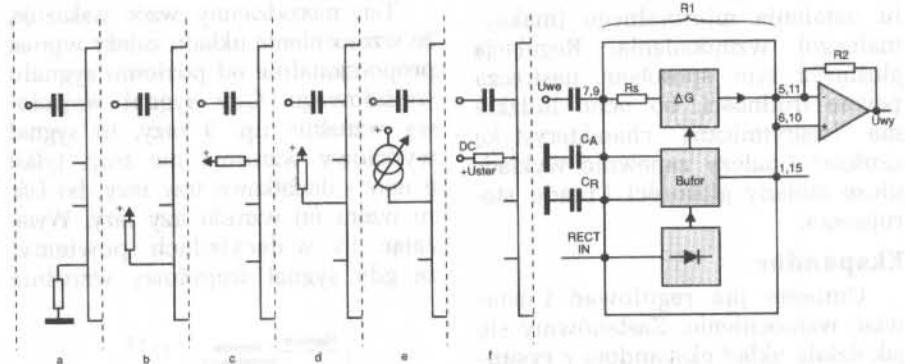
Dla konfiguracji z rys. 4 możemy po podstawieniu:

$$R_1 = R_s \cdot \frac{140\mu A}{I_g}$$

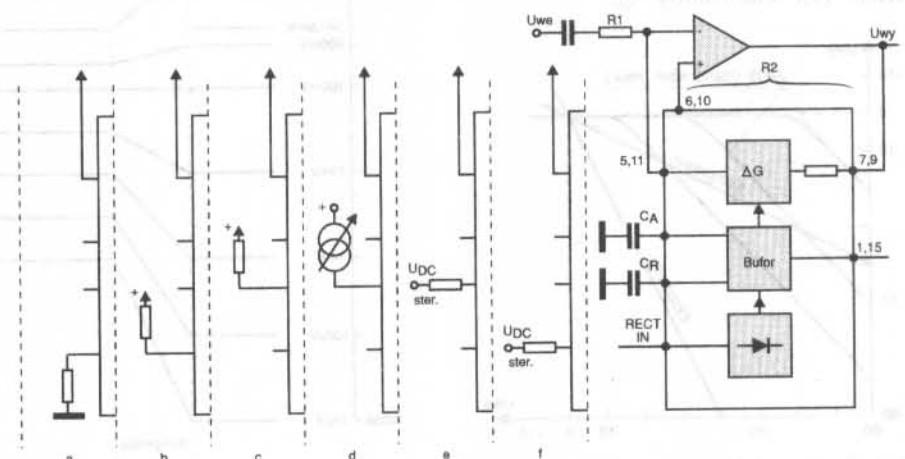
podać ogólny wzór na wzmocnienie:

$$K_u = \frac{R_2 \cdot I_g}{R_s \cdot 140\mu A} = A1 \cdot I_g \quad (4)$$

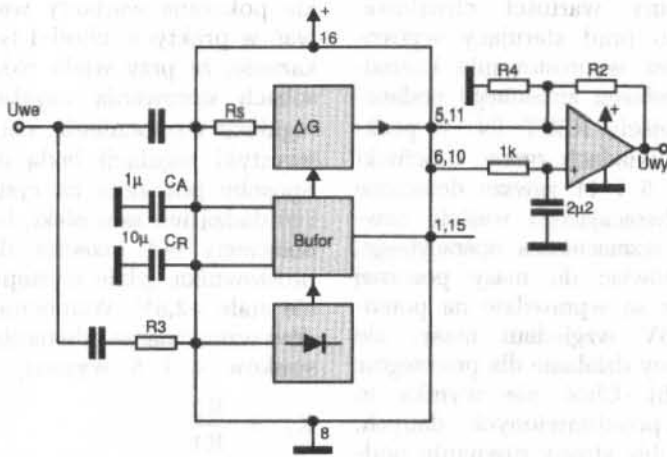
Ponieważ dla konkretnego układu wartości elementów są stałe, w tym miejscu i dalej dla uproszczenia wprowadzamy współczynniki $A1, A2$ itd. Np.:



Rys. 4. Poglądowy regulator wzmocnienia "przed"



Rys. 5. Poglądowy regulator wzmocnienia "po"



Rys. 6. Ekspandor

$$\frac{R2}{R_s \cdot 140\mu A} = A1 = \text{const}$$

Wzmocnienie jest więc tu wprost proporcjonalne do prądu I_g . Analogicznie dla konfiguracji z rys. 5 otrzymamy:

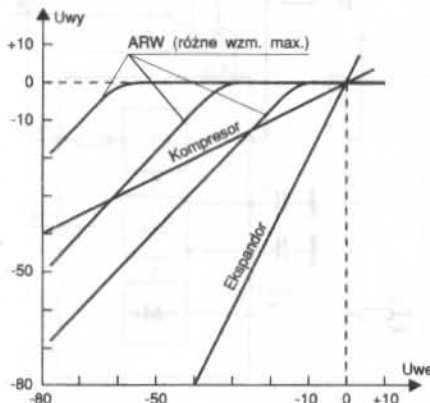
$$K_u = \frac{A2}{I_g} \quad (5)$$

zatem zmniejszanie prądu sterującego spowoduje tu zwiększanie wzmocnienia.

W praktyce stosuje się często połączenie z rysunków 4a i 5a w celu ustalenia minimalnego (maksymalnego) wzmocnienia. Regulacja głośności tym sposobem nastęrcza pewne trudności, bo ucho ludzkie ma logarytmiczną charakterystykę czułości i należy zapewnić wykładnicze zmiany głośności i prądu sterującego.

Ekspandor

Umiemy już regulować i ustawić wzmocnienie. Zastanówmy się jak działa układ ekspandora z rysunku 6. Nadal wzmocnienie określa wzór (4). Określamy I_g :



Rys. 7. Charakterystyka przejściowa dla ARW, kompresora i ekspandora

$$I_g = 2 \frac{U_{wosr}}{R3} \quad (6)$$

Dla wyprostowanego przebiegu sinusoidalnego

$$U_{sr} = 0,9 \cdot U_{sk} = 0,636 \cdot U_{ampl} \quad (7)$$

Po podstawieniu do zależności (4) otrzymujemy wzór na wzmocnienie ekspandora:

$$K_u = \frac{2 \cdot R2 \cdot U_{sr}}{140\mu A \cdot R_s \cdot R3} = A3 \cdot U_{sr} \quad (8)$$

Ten niecodzienny wzór wskazuje, że wzmocnienie układu zależy wprost proporcjonalnie od poziomu sygnału wejściowego. Gdy sygnał wejściowy wzrośnie np. 3 razy, to sygnał wyjściowy wzrośnie nie trzy, tylko 9 razy - dodatkowo trzy razy, bo U_{sr} ze wzoru (8) wzrosło trzy razy. Wyrażając to w decybelach powiemy, że gdy sygnał wejściowy wzrośnie

o n decybeli, to sygnał wyjściowy wzrośnie o $2n$ decybeli. Pokazują to rysunki 7 i 8. Na obu rysunkach odnajdujemy punkt charakterystyki (poziom sygnału wejściowego), gdy wzmocnienie wynosi 1, czyli 0dB. Jest to ważny parametr charakterystyczny ekspandora. Aby go znaleźć, wystarczy do wzoru (8) podstawić $K_u = 1$. Wzmocnienie wyniesie 1 dla napięcia wejściowego:

$$U_{sr} = \frac{140\mu A \cdot R_s \cdot R3}{2 \cdot R2} \quad (9)$$

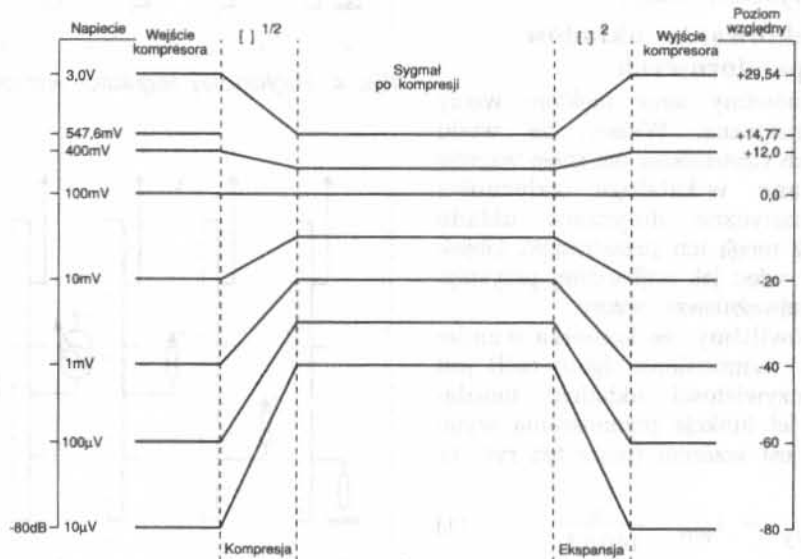
Pozostają jeszcze dwie ważne kwestie: maksymalne napięcie wejściowe i napięcie stałe na wyjściu.

Maksymalny prąd szczytowy wejścia sygnałowego nie może przekroczyć $140\mu A$, wejścia prostownika - $300\mu A$. Wewnętrzny rezystor R_s ma wartość $6,8k\Omega$, więc maksymalna amplituda sygnału wejściowego nie może przekroczyć $952mV$. A co zrobić, gdy pracujemy z większymi sygnałami? Po prostu trzeba dodać zewnętrzny rezystor w szereg z R_s .

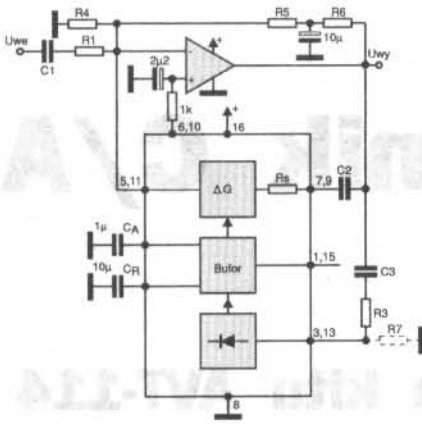
Także rezystor $R3$ powinien mieć taką wartość, aby przy maksymalnym sygnale wejściowym prąd był bliski maksymalnej wartości $300\mu A$. Uzyskamy wtedy lepszą stabilność parametrów i mniejsze szумы niż w układzie, gdzie prądy będą dużo mniejsze.

Na rysunku 6 znajdujemy też rezystor $R4$. Jego jedyną rolą jest ustawienie stałego napięcia wyjściowego na poziomie połowy napięcia zasilania według wzoru:

$$U_{wyDC} = 2,5V \cdot \left(1 + \frac{R2}{R4}\right) \quad (10)$$



Rys. 8. Poglądowa ilustracja kompresji i ekspansji



Rys. 9. Kompresor

Otwiera to możliwość uzyskania dużych napięć sygnałów wyjściowych.

Kompresor

Potrafimy już zaprojektować ekspandor, przejdźmy do układu kompresora. Schemat znajdziemy na rysunku 9.

Po podstawieniu do (3) zależności (2) i (6) otrzymamy po przekształceniach wzór na wzmocnienie kompresora:

$$K_u = \left(\frac{140 \mu\text{A} \cdot R_3 \cdot R_s}{2 \cdot R_1 \cdot U_{\text{wesz}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Wzmocnienie jest odwrotnie proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego z wartości napięcia wejściowego. Przy małych sygnałach wejściowych wzmocnienie jest duże i maleje ze wzrostem amplitudy sygnału. Układ zawęża dynamikę: sygnały najmniejsze są wzmacniane, największe osłabiane. Po kompresji sygnał wejściowy o dynamice np. 80dB zostaje „ściśnięty” do zakresu 40dB. Może być łatwo przesłany lub zapisany w torze o niewielkiej dynamice. Później oryginalny sygnał można odtworzyć za pomocą ekspandora. Omówiony tu sposób jest często wykorzystywany w praktyce. Dokładnie tak działa magnetofonowy system redukcji szumu dbx. W telefonii, radiotelefonach, mikrofonach bezprzewodowych kompendery stosuje się powszechnie.

Niedawno opisywaliśmy układy scalone do rejestracji dźwięku serii ISD10xx. Mówiliśmy o ich niewielkiej dynamice. Jeśli przed zapisem sygnał zostanie poddany kompresji, a przy odtworzeniu ekspansji, to uzyskamy bardzo dobry stosunek

sygnał/szum i wysoką jakość generowanych komunikatów. Charakterystyki idealnego kompresora znajdziemy również na rys. 7 i 8. Przy braku sygnału wzmocnienie teoretycznie dąży do nieskończoności, w praktyce bardzo często ogranicza się maksymalne wzmocnienie sposobem pokazanym na rys. 5a. Poziom sygnału, dla którego wzmocnienie wynosi 0dB, możemy obliczyć podanym wcześniej sposobem.

Rezystory R4, R5, R6 ustalają wartość napięcia stałego na wyjściu (bez R4 będzie to 2,5V):

$$U_{\text{wyDC}} = 2,5 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{R_5 + R_6}{R_4} \right) \quad (12)$$

Pojemność C4 musi być na tyle duża, aby skutecznie odfiltrować przebiegi o częstotliwościach akustycznych.

Automatyczna regulacja wzmocnienia

Trzecią możliwością wykorzystania jest układ automatycznej regulacji wzmocnienia. W większości przypadków sygnał regulacyjny ARW tworzy się przez wzmocnienie i wyprostowanie sygnału wyjściowego. Tu jest inaczej - prostujemy sygnał wejściowy - układ jest bardzo podobny do kompresora, tylko wejście prostownika RECT IN dołączone jest do wejścia, a nie do wyjścia. Ze wzorów (2), (3) i (6) obliczamy wzmocnienie:

$$K_u = \frac{140 \mu\text{A} \cdot R_s \cdot R_3}{2 \cdot R_1 \cdot U_{\text{wesz}}} \quad (13)$$

Rzeczywiście, gdy Uwe wrośnie n razy, to wzmocnienie spadnie też n razy i poziom sygnału na wyjściu będzie zawsze jednakowy. W praktyce zawsze należy ograniczyć wzmocnienie maksymalne do sensownej wartości, aby nie wzmacniać nadmiernie bezużytecznych szumów zawsze występujących w układach. W systemach nagłośnieniowych brak takiego ograniczenia powodowałby wzbudzenie przy małych sygnałach z mikrofonu. Dodanie rezystora R7 (narysowany na rys. 9 linią przerywaną) ogranicza wzmocnienie maksymalne do wartości:

$$K_{u \text{ max}} = \frac{140 \mu\text{A} \cdot R_s \cdot R_7}{2 \cdot R_1 \cdot 2,5 \text{ V}} \quad (14)$$

Dla układu ARW podstawowym parametrem jest poziom napięcia wyjściowego. Ze wzorów (13) i (7)

przy podstawieniu $K_u = U_{\text{wy}} / U_{\text{we}}$ otrzymujemy dla przebiegu sinusoidalnego:

$$U_{\text{wysk}} = \frac{77,7 \mu\text{A} \cdot R_s \cdot R_3}{R_1} \quad (15)$$

Napięcie stałe na wyjściu dobierzemy korzystając z zależności (12).

Analogicznie jak w układzie ekspandora, przy amplitudach sygnałów wyjściowych większych niż 952mV musimy dodać zewnętrzny rezystor w szereg z R_s i odpowiednio dobrać R3, aby nie przekroczyć granicznych wartości prądów wejściowych kostki NE572.

Na rysunkach 6 i 9 układy zasilane są napięciem pojedynczym. W niektórych przypadkach korzystniejsze może okazać się zasilanie symetryczne. Układ NE572 dalej będzie zasilany tylko napięciem dodatnim, a wzmacniacz operacyjny - symetrycznym. Aby uzyskać stałe 0V (potencjał masy), należy rezystor R4, zamiast do masy, dołączyć do plusa zasilania.

Podaliśmy tu wszystkie recepty dla kucharza, który chce przyrządzić smakowicie kostkę NE572 według własnego upodobania. Wypada jeszcze wspomnieć o ewentualnych źródłach kłopotów. W większości przypadków nie będą potrzebne żadne dodatkowe środki pomocnicze - układy wewnętrzne są skompensowane temperaturowo, a napięcia niezrównoważenia mają niewielką wartość. Aby wykorzystać wszystkie możliwości można spróbować kompensować napięcia niezrównoważenia. Nie będziemy omawiać tego szczegółowo, zainteresowanych odsyłamy do katalogu Philipsa lub do zeszytów USKA 7, 8, 9/93. Opisano tam układy NE 570, 571, 572, 576; można tam znaleźć kilka wskazówek dotyczących kompensacji napięć niezrównoważenia, co zmniejszy zniekształcenia nieliniowe i poprawi współbieżność przy najmniejszych poziomach sygnału.

W następnej części (EP 6/94) przedstawimy szczegółowy opis konstrukcji komparatora na podstawie modelu opracowanego w AVT i oferowanego w postaci zestawu AVT-180.

Piotr Górecki, AVT