

# Wzmacniacze operacyjne

## Odcinek 2

W dzisiejszym krótkim odcinku znajdziesz odpowiedź, czym różnią się poszczególne wzmacniacze operacyjne.

Praktyczne wykorzystanie wspólnych wzmacniaczy operacyjnych jest niezwykle proste. Mają one bardzo dobre parametry, wobec czego bez ograniczeń można wykorzystywać podane wcześniej układy pracy, wzory i zależności.

Przed wszystkim powinieneś wiedzieć, że najpopularniejsze wzmacniacze operacyjne są dość odporne na uszkodzenia. Na przykład wszystkie mają obwody ochrony wyjścia w przypadku zwarcia. Uszkodzenia wynikające z niewłaściwego obchodzenia się z nimi są bardzo rzadkie. Nie znaczy to, że nie należy zachowywać żadnych środków zabezpieczających - trzeba montować je ostrożnie, tak jak układy CMOS. Na pewno nie zaszkodzi, gdy grot lutownicy będzie ziemiony. Nie można ich przeciążać, dołączając obciążenie o zbyt małej wartości. Warto je lutować w płytkę na końcu, po zmontowaniu innych elementów. Może się wydać dziwne, że zalecenie to nawet bardziej dotyczy najnowszych, znakomitych, ale i delikatnych wzmacniaczy.

Prawdopodobnie już się zorientowałeś, że układ wyprowadzeń wzmacniaczy operacyjnych jest znormalizowany. Na rysunku 20 zobaczysz układ wyprowadzeń wzmacniaczy pojedynczych, podwójnych i poczwórnych, który powinieneś pamiętać o każdej porze dnia i nocy.  $V_{CC}$  oznacza dodatnie napięcie zasilania,  $V_{EE}$  ujemne napięcie zasilania. W wypadku wzmacniaczy pojedynczych występują trzy wolne końcówki. Dwie z nich (1 i 5 albo 1 i 8) bywa-

ją wykorzystywane w niektórych precyzyjnych zastosowaniach. Ciebie na razie to nie interesuje, końcówki te pozostawisz nie podłączone - układ będzie normalnie działał. O roli i sposobach wykorzystania tych końcówek porozmawiamy później.

Na początek zwrócę Twoją uwagę na kilka najpopularniejszych układów: LM358, LM324, TL072 (lub TL082), NE5532 (lub LM833), TL071 (lub TL081, LF356) i TLC271 (=ICL7611).

Zapewne drżysz z niecierpliwości i pytasz, czym się one różnią, i które do czego stosować. Za chwilę to wyjaśnię, ale wcześniej wspomnę o kilku najważniejszych cechach charakterystycznych i parametrach; subtelnosciami zajmiemy się później.

Wiem, że na razie nie rozumiesz wszystkiego, ale nie przejmuj się - do danych z tego odcinka będziesz wielokrotnie wracał w trakcie cyklu. A oto znaczenie poszczegól-

nych parametrów, które spotkasz w katalogach.

$U_{os}$  [mV] - wejściowe napięcie niezrównoważenia,

TC  $U_{os}$  [mV/C] - współczynnik cieplny napięcia niezrównoważenia,

CMRR [dB] - współczynnik tłumienia sygnału wspólnego,

SVRR [dB] - współczynnik tłumienia wahań zasilania -

informują, na ile wzmacniacz nadaje się do zastosowań precyzyjnych (np. układów pomiarowych),

$U_{IN\ com}$  [V] - zakres roboczych (wspólnych) napięć wejściowych

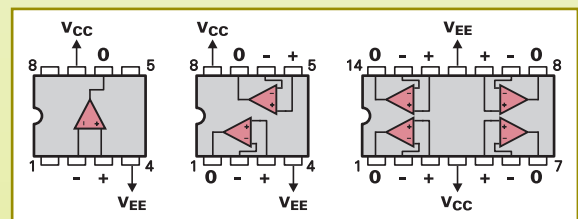


Tabela 1

Rys. 20.

Typ	Podstawowe cechy	Zasilanie: - zakres napięć zasilania - prąd zasilania	Zakres napięć wejściowych (wspólnych)	Prąd polaryzacji wejść	Szybkość:	Szumy	Precyzyja - napięcie niezrównoważenia
uA741	standardowy	0	0	0	0	0	0
LM358	standardowy	+( $U_{ccmin}=5V$ )	+(obejmuje $V_{EE}$ )	0	0	0	0
LM324	standardowy	0	+(obejmuje $V_{CC}$ )	+	+	0	0
TL08X	niskie szumy	0	+(obejmuje $V_{CC}$ )	+	+	+	0
TL07X	mały pobór prądu	+(mały pobór prądu)	+(obejmuje $V_{CC}$ )	+	-	-	0
TL06X	ulepszony	0	+(obejmuje $V_{CC}$ )	+	+	+	0
LF356	niskoszumny	-	0	-	+	++	+
NE5532	niskoszumny	-	0	-	+	++	+
LM833	programowany	+( $U_{ccmin}=3V$ )	+(obejmuje $V_{EE}$ )	++	0	0	0
TLC271/a	programowany	++ ( $U_{ccmin}=3V$ + mały pobór prądu)	+(obejmuje $V_{EE}$ )	++	-	-	0
TLC271/b	programowany	+++ ( $U_{ccmin}=3V$ + bardzo mały pobór prądu)	+(obejmuje $V_{EE}$ )	++	-	-	0
TLC271/c	standardowy	0	0	0	0	0	0

Typ	U <sub>os</sub> [mV]	I <sub>BIAS</sub>	TC U <sub>os</sub> uV/°C	U <sub>IN</sub> com.	U <sub>IN</sub> dif. [V]	Gain	GBP MHz	Slew Rate V/us	U <sub>NOISE</sub> nV/√Hz	U <sub>cc</sub>	I <sub>cc</sub> [mA]	CMRR [dB]	SVRR [dB]	Uwagi
LM358 LM324	typ ±2 max ±7	typ 45nA max 50nA	7	V <sub>cc</sub> -1,5V V <sub>EE</sub>	±32	typ 100000	1	0,5	25	min 3V (±1,5V) max 32V (±16V)	typ 0,7 max 1,2	typ 70 min 65		
TL08X	typ ±3 max ±15	typ 30pA max 400pA	10	V <sub>cc</sub> V <sub>EE</sub> +3V	±30	typ 200000 min 25000	3	13	25	max 36V (±18V)	typ 1,4 max 2,8	typ 76 min 70	typ 76 min 70	
TL07X	typ ±3 max ±10	typ 30pA max 200pA	10	V <sub>cc</sub> V <sub>EE</sub> +3V	±30	typ 200000 min 25000	3	13	18	max 36V (±18V)	typ 1,4 max 2,5	typ 76 min 70	typ 76 min 70	
TL06X	typ ±3 max ±15	typ 30pA max 200pA	10	V <sub>cc</sub> V <sub>EE</sub> +3V	±30	typ 6000	1	3,5	42	max 36V (±18V)	typ 0,2 max 0,25	typ 76 min 70	typ 95 min 70	
LF356	typ ±3 max ±10	typ 30pA max 200pA	5	V <sub>cc</sub> +0,1V V <sub>EE</sub> +3V	±40	typ 200000 min 25000	5	12	12	max 44V (±22V)	typ 5 max 10	typ 100 min 85	typ 100 min 80	
NE5532	typ ±0,5 max ±4	typ 0,2uA max 0,8uA	5	V <sub>cc</sub> -2V V <sub>EE</sub> +2V	±0,5	typ 100000 min 25000	10	9	5	min 6V (±3V) max 44V (±22V)	typ 8 max 16	typ 100 min 70	typ 100 min 80	
LM833	typ ±0,3 max ±5	typ 0,3uA max 1uA	2	V <sub>cc</sub> -1V V <sub>EE</sub> +1V	±30	typ 300000 min 30000	15	7	4,5	max 36V (±18V)	typ 4 max 8	typ 100 min 80	typ 115 min 80	
TLC271/a	typ ±1,1 max ±10	typ 0,7pA	2	V <sub>cc</sub> -1,5V V <sub>EE</sub> -0,2V	±18	typ 23000 min 5000	1,7	3,6	25	min 3V (±1,5V) max 16V (±8V)	typ 0,7 max 1,6	typ 80 min 65	typ 95 min 65	n.8 zwarta do V <sub>EE</sub>
TLC271/b	typ ±1,1 max ±10	typ 0,7pA	2	V <sub>cc</sub> -1,5V V <sub>EE</sub> -0,2V	±18	typ 170000 min 25000	0,5	0,4	32	min 3V (±1,5V) max 16V (±8V)	typ 0,14 max 0,3	typ 91 min 65	typ 93 min 70	U <sub>o</sub> >V <sub>EE</sub> +1V U <sub>o</sub> <V <sub>cc</sub> -1V
TLC271/c	typ ±1,1 max ±10	typ 0,7pA	1	V <sub>cc</sub> -1,5V V <sub>EE</sub> -0,2V	±18	typ 500000 min 50000	0,09	0,03	68	min 3V (±1,5V) max 16V (±8V)	typ 0,014 max 0,023	typ 94 min 65	typ 97 min 70	n.8 zwarta do V <sub>cc</sub>
741 ULY7741	typ ±2 max ±6	typ 80nA max 0,5uA	10	V <sub>cc</sub> -2V V <sub>EE</sub> +2V	±30	typ 200000 min 20000	1	0,5	20	max 38V (±18V)	typ 1,4 max 2,8	typ 90 min 70	typ 100 min 70	
LM301 ULY7701	typ ±2 max ±7,5	typ 70nA max 0,25uA	6	V <sub>cc</sub> -3V V <sub>EE</sub> +3V	±30	typ 160000 min 25000	1...3	0,5	15	max 38V (±18V)	typ 1,8 max 3	typ 90 min 70	typ 96 min 70	

Tabela 2

pokazuje, w jakim zakresie napięć wejściowych może normalnie pracować wzmacniacz;

U<sub>IN</sub> dif [V] - dopuszczalne napięcie różnicowe -

informuje, jakie napięcia wejściowe nie wywołają uszkodzenia.

Na szybkość wzmacniacza, czyli przydatność do pracy przy większych częstotliwościach wskazują

GBP [MHz] - iloczyn wzmocnienia i szerokości pasma,

Slew Rate [V/us] - szybkość zmian napięcia wyjściowego.

O szumach informuje

U<sub>NOISE</sub> nV/√Hz - napięciowa gęstość szumów,

Parametry:

Gain - wzmocnienie dla prądu stałego

U<sub>cc</sub> - zakres napięć zasilania,

I<sub>cc</sub> - prąd zasilania,

I<sub>BIAS</sub> [nA] - prąd polaryzacji wejść

nie wymagają komentarza.

Oprócz tych głównych parametrów, w katalogach występują jeszcze inne. Ich szczegółowe omówienie zajęłoby niejednego odcinek cyklu. Pomińmy je na razie - ekspertem od wzmacniaczy operacyjnych nie zostaniesz w półtora miesiąca. W tabeli 1 znajdziesz główne cechy charakterystyczne najpopularniejszych kostek w odniesieniu do znanej i popularnej przez wiele lat kostki uA741. Znak 0 wskazuje, że dany parametr ma wartość mniej więcej taką, jak układ 741. Znaki "+" oraz "-" wskazują, czy dany parametr jest lepszy, czy gorszy niż w tym znanym układzie. W tabeli 2 znajdziesz podstawowe parametry najpopularniejszych wzmacniaczy operacyjnych. Czerwonym kolorem zazaczyłem parametry szczególnie godne uwagi. Zwróć na nie większą uwagę.

W tabeli 3 zestawiałem dodatkowo wyróżniające się wzmacniacze z oferty znanej firmy Analog Devices. Podobne układy produkują także firmy Burr-Brown, Maxim, Linear Technology, Elantec. Zwróć uwagę, jak bardzo różnią się podane kluczowe parametry od parametrów "standardowej" kostki uA741. Zauważ, że zazwyczaj zdecydowaną poprawę jednych parametrów okupuje się pogorszeniem innych. Mimo wszystko parametry nowoczesnych układów są zadziwiająco, prawda?

Nie sądzę jednak, że i Ty musisz stosować wspaniałe, ale drogie i trudno dostępne

Tabela 3

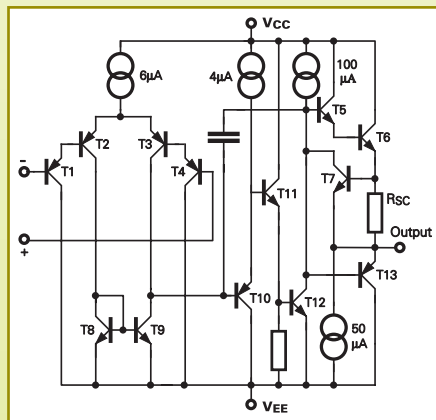
Typ	U <sub>os</sub> [mV]	I <sub>BIAS</sub> [nA]	GBP MHz	Slew Rate V/us	U <sub>NOISE</sub> nV/√Hz	U <sub>cc</sub> min max	I <sub>cc</sub> [mA]	Uwagi
741 ULY7741	typ 2 max 6	typ 80 max 500	1	0,5	20	±5V ±18V	1,4	
AD549L	typ 0,3 max 0,5	max 0,00006	1	3	35	±5V ±15V	0,6	elektrometryczny
AD8551	typ 0,001 max 0,005	typ 0,02	1,5	0,8	-	+2,7V +5V	0,6	z przetwarzaniem
OP177A	typ 0,004	max 1,5	0,6	0,3	10	±2,5 ±20	1,6	ultraprecyzyjny
AD797B	typ 0,01	typ 250	10	20	0,9	±5 ±18	8,2	ultraniskoszumny precyzyjny
AD840K	typ 0,1	3500	400	400	4	±5 ±18	12	precyzyjny bardzo szybki
AD8055	typ 3	typ 400	min 200	1400	6	±4 ±6	5,4	bardzo szybki
AD829A	typ 0,2	typ 3300	750	230	1,7	±4,5 ±18	5,0	bardzo szybki niskoszumny
AD8051	typ 1,7	1400	80	170	16	±1,5 ±6	4,4	bardzo szybki
AD825	typ 1	0,015	30	140	12	±5 ±15	6,5	szybki, mały prąd wejściowy
AD8031	typ 0,5	450	40	32	15	+2,7 +12	0,8	szybki energooszczędny
OP90A	typ 0,05	40	0,02	0,012	60	±0,8 ±18	0,01	precyzyjny energooszczędny
OP191	max 1,5	3	0,095	0,025	75	±1,35 ±6	typ 0,003 max 0,004	energooszczędny
AD8541	typ 1	0,0001	0,5	0,6	100	+2,7 +5,5	0,035	małe prądy

Piotr Górecki

znaczone 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 pominać prądu polaryzacji wejść, którego wartość byłaby porównywalna z prądami płynącymi w rezystorach. Wcześniejsze 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 - a 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 wspólnych. Pobierają też w spoczynku więcej prądu, około 4...5mA. Ale za to mają zdecydowanie



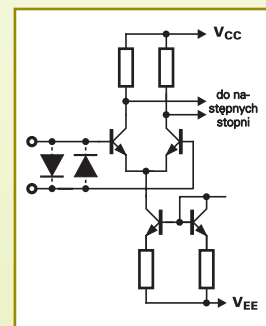
Rys. 21.

mniejsze szumy i są przeznaczone do niskoszumnych układów audio. Układ NE5532 ma ponadto zwiększoną wydajność prądową wyjścia i jako jeden z niewielu dodatkowo dwie włączone przeciwobnie-równoległe diody na wejściu (na rysunku 22 zaznaczone linią przerywaną), ale to nie przeszkadza, bo w sprzęcie audio zawsze pracuje w zakresie liniowym, gdy napięcia na obu wejściach są równe (wirtualne zwarcie), a nigdy tak, jak na rysunku 8.

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 wejść. Wzmacniacze te mają stosunkowo duży prąd polaryzacji wejścia, rzędu 0,04µA. To jest wbrew pozorom dość dużo. W poprzednim odcinku dowiedziałeś się, że wzmacnienie wy-

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 = 0,00003µA), 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 - 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



Rys. 22.

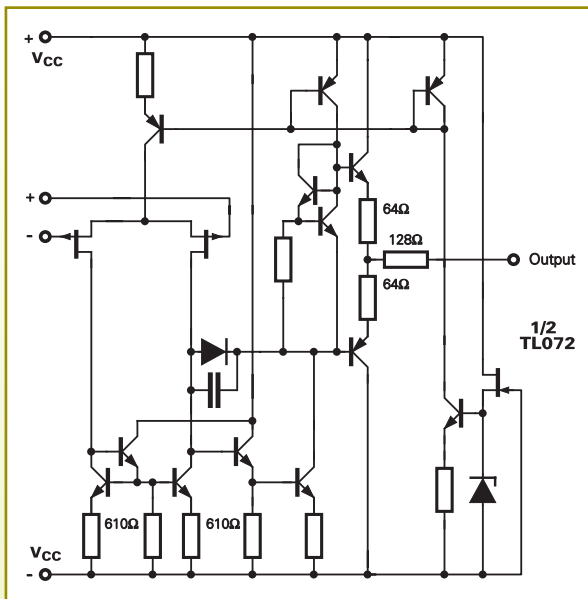
szybsze niż LM358, LM324. Natomiast TL061, TL062, TL064 są wprawdzie wolniejsze (ale i tak szybsze od LM358, 324), pobierają za to tylko 0,2mA prądu zasilania.

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 wzmacnienie nie powinno być większe niż 100x (40dB).

Wszystkie wymienione układy mogą śmiało pracować przy napięciu zasilającym do 30V (±15V). Najniższe napięcie zasilania zalecane dla kostek TL0XX, LF356, NE5532, LM833 to 10V (±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 (±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 takich LM-ów jest jedynym prostym wyjściem.

Kostka TLC271 to wzmacniacz wykonany w technologii CMOS (rysunek 24),



Rys. 23.

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 jeszcze niższym 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 jest w temperaturze pokojowej rzędu tylko

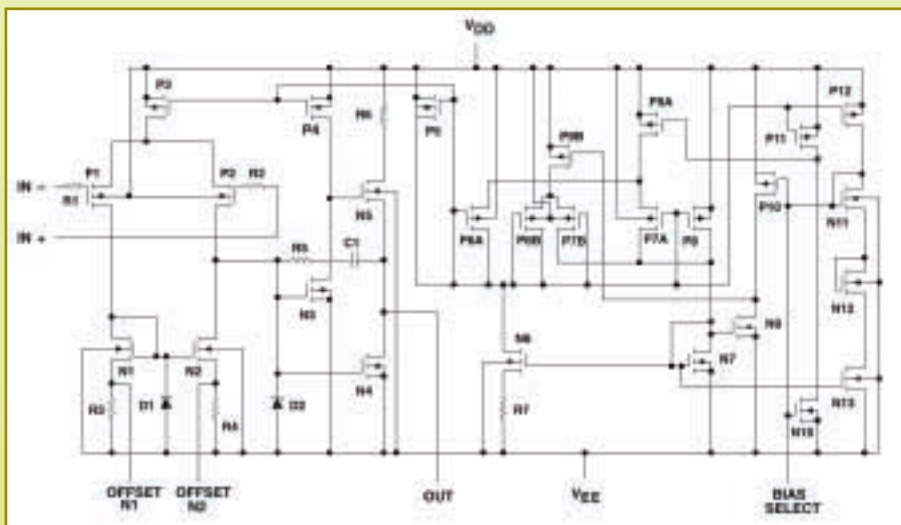
1pA (!), a przy  $+70^{\circ}C$  rośnie do około 50pA. Nóżka nr 8 tej kostki decyduje o właściwościach: gdy jest zwarta do minusa zasilania, układ jest mniej więcej tak szybki jak LM358, 324 i pobiera z zasilacza ok. 1mA prądu. Gdy nóżka 8 dołączona jest do napięcia równego połowie napięcia zasilania, 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 się także szybkość wzmacniacza i wydajność prądowa wyjścia.

## Wskazówki praktyczne

Jak się przekonałeś, kilka wymienionych 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. 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 po-

rywaj 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 ogólnie 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),

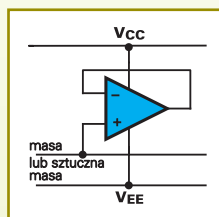


Rys. 24.

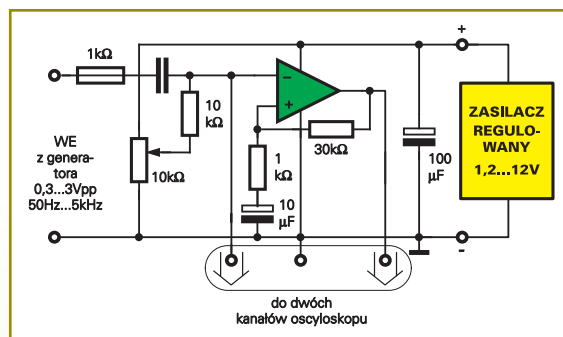
Ponadto kostka nie może pracować przy napięciach zasilania niższych niż 8...10V ( $\pm 4... \pm 5V$ ). Jeśli masz ją za darmo - stosuj śmiało, ale jeśli masz kupić - kup jedną z wcześniej wymienionych. To samo dotyczy układu LM301 (krajowy odpowiednik ULY7701). Jest to dość przyzwoita kostka starszej generacji (parametry porównywalne z TL081), ale wymaga dołączenia jednego kondensatora (4,7...30pF) do nóżek 1, 8, by się nie wzbudzała. Jeśli masz za darmo - stosuj.

Kilka razy wspomniałem 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 znacznie przede wszystkim dla prądów sta-

łych. Natomiast dla przebiegów zmiennych w rzeczywistości masą jest ujemny biegun zasilania. Rysunki 25a oraz 25b pokazują sposoby realizacji takiego samego wzmacniacza przy podwójnym i pojedynczym zasilaniu. W układzie z rysunku 25b sztuczną masę wytwarza się przy pomocy dwóch jednakowych rezystorów. Wartość tych rezystorów należy



Rys. 26.



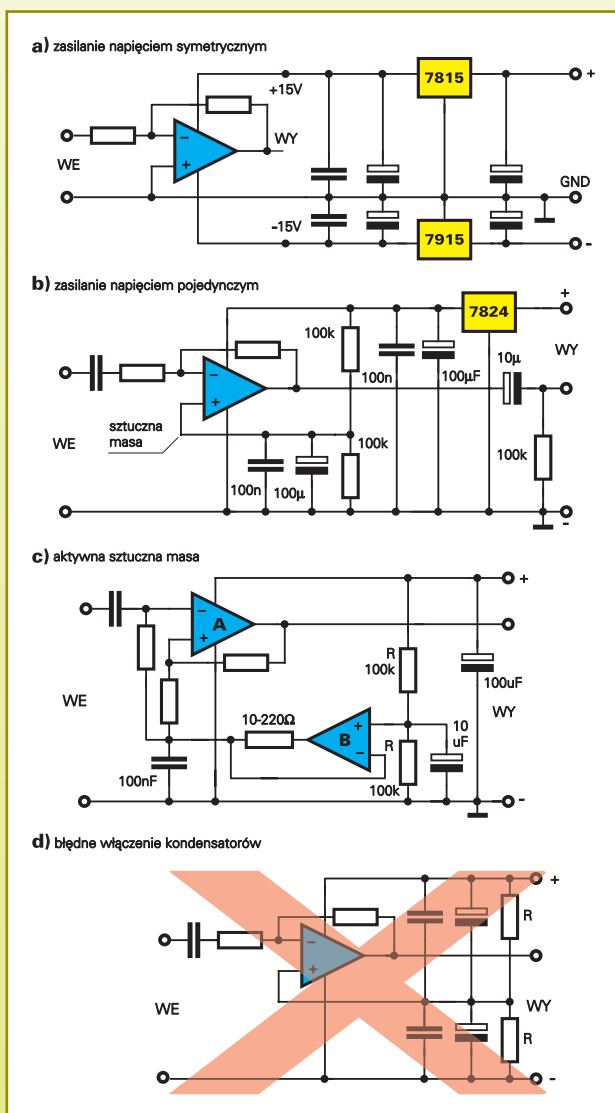
Rys. 27.

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 "lizarek" (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 "lizarek", który odfiltruje zakłócenia o wysokiej częstotliwości. Rezystor dziwnie włączony na wyjściu wzmacniacza operacyjnego B nie zawsze jest konieczny, jednak niektóre wzmacniacze mają tendencję do samowzbudzenia przy obciążeniu pojemnościowym.

W rzeczywistych układach nie zawsze stosuje się stabilizatory napięcia zasilania. W rezultacie między szynami zasilania występują mniejsze lub większe "śmieci", 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 "śmieci" są tylko o połowę mniejsze niż na dodatniej szynie zasilania i przenoszą się na wyjście. Jest to bardzo istotna sprawa, o której nie można zapominać, zwłaszcza w sprzęcie audio i pomiarowym.

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



Rys. 23.

płytkę uniwersalną z wlutowana 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 wprowadza do swej oferty kolejny zestaw startowy zawierający najpotrzebniejsze wzmacniacze operacyjne.

**(kit startowy - wzmacniacze operacyjne AVT-7??)**

LM358	4szt
LM324	2szt
TL062	1szt
TL072	6szt
NE5532	1szt
TL071 lub LF356	3szt
TL061	2szt
TLC271 lub ICL7611	1szt

## 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.

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 szczególnie innymi właściwościami i parametrami wzmacniaczy.