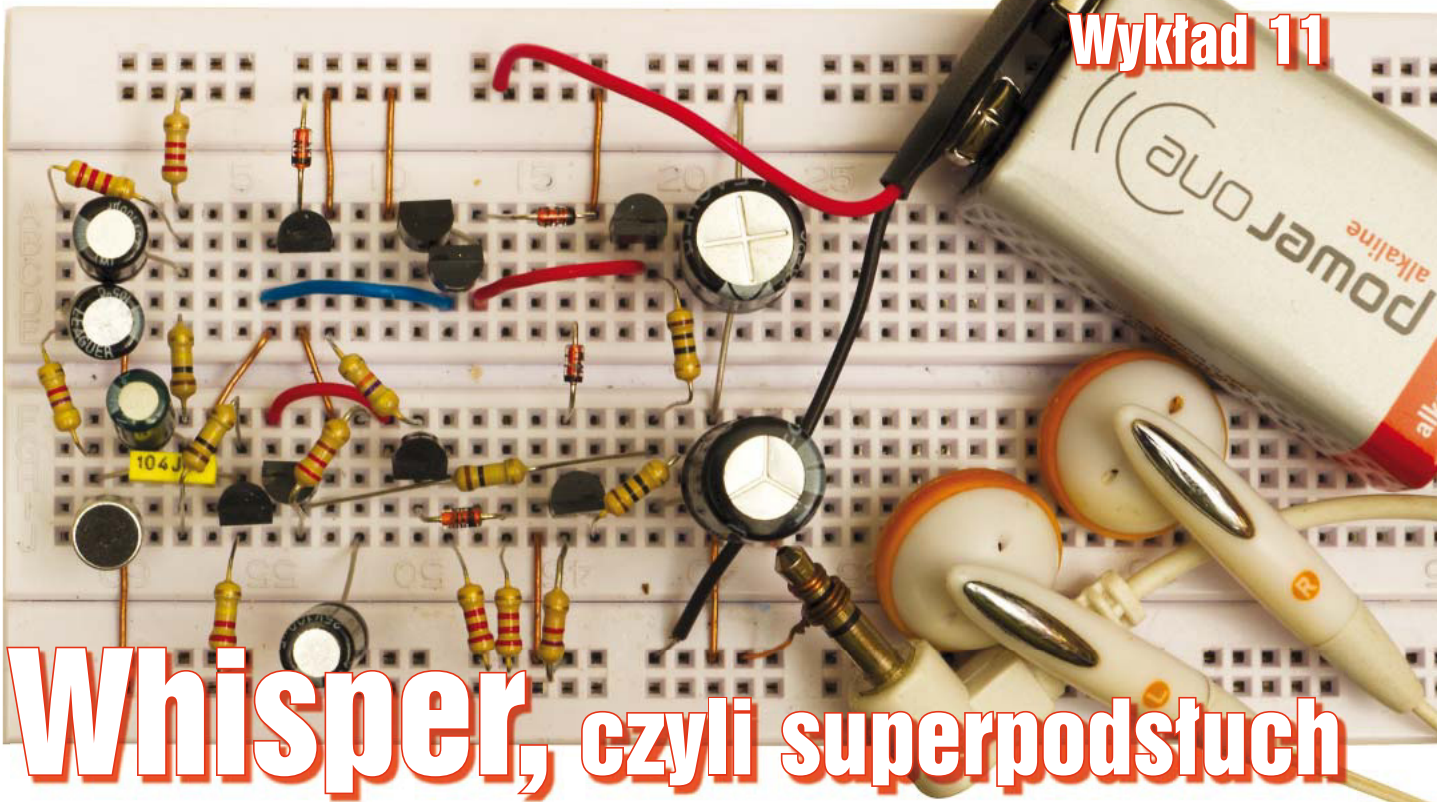


## PKE – Praktyczny Kurs Elektroniki

## Wykład 11



# Whisper, czyli superpodstuch

Proponuję, żebyś wykonał superpodstuch, bardzo czuły wzmacniacz z mikrofonem elektretowym i słuchawkami. Do jego wejścia można podłączyć różne czujniki. My podłączymy mikrofon, natomiast inne czujniki będziemy testować podczas ćwiczeń następnego wykładu. Czuły wzmacniacz z mikrofonem pozwoli wychwycić najcichsze szepty. Najlepszy efekt uzyskasz na otwartej przestrzeni, na łonie natury, poza domem. Zdziwisz się jak brzmi w słuchawkach wzmocniony śpiew ptaków, szczekanie psów i rozmaite odgłosy życia codziennego. Czułość wzmacniacza możesz regulować według upodobań i potrzeb, zmieniając wartość tylko jednego rezystora.

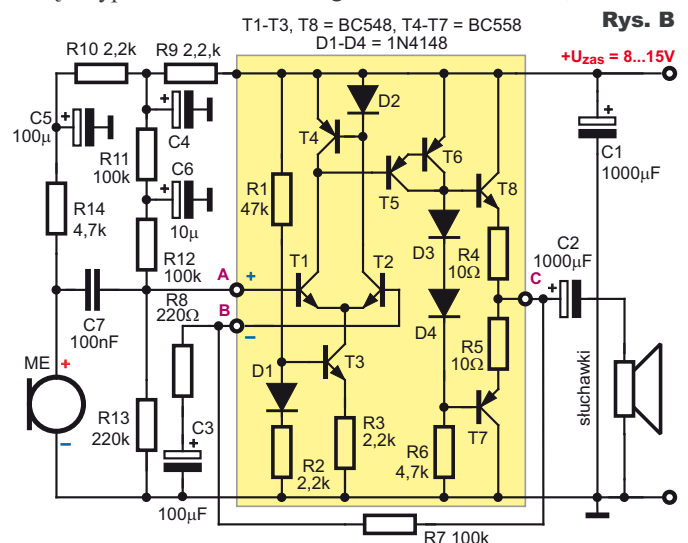
Fot. A



Jestem przekonany, że bez problemu pokonasz jedną drobną przeszkodę. Mianowicie potrzebne są jakieś słuchawki – na pewno znajdziesz jakieś w swoich zapasach. Słuchawki te trzeba podłączyć do płytki stykowej. Nie zalecam cięcia przewodów. Proponuję, żebyś dołączył słuchawki za pomocą kawałków drutu zaciśniętych (za pomocą szczypiec – kombinerek) na wtyku. Ze słuchawek stereo trzeba zrobić słuchawki mono. Jak pokazuje **fotografia A**, możesz połączyć je równoległe lub pominać wyprowadzenie masy i wykonać połączenie szeregowo. Zapewne z powodzeniem poradzisz sobie

z takim zadaniem i sensownie dołączysz słuchawki do płytki.

Omawiany układ elektroniczny jest przedwzmacniaczem mikrofonowym o dużej czułości. W zasadzie, zamiast do słuchawek, można by go dołączyć do wejścia AUX domowego zestawu audio. Nie proponuję takiego rozwiązania, ponieważ układ będzie się łatwo wzbudzał z uwagi na sprzężenie na drodze głośniki – mikrofon, więc nie wykorzystasz dużej czułości. Aby takie rozwiązanie z głośnikami miało sens, mikrofon



należałoby umieścić w innym budynku lub w oddalonych pomieszczeniach gdzie nie dociera dźwięk z głośników.

Oprócz podsłuchiwania klasycznych dźwięków, możesz też dołączyć mikrofon za pomocą dłuższego dwużyłowego przewodu i badać np. przewodnictwo dźwięków przez ściany, przez metalowe rury instalacji wodociągowej czy centralnego ogrzewania.

### Opis układu dla „zaawansowanych”

Schemat *Whispera – superpodsłuchu* jest pokazany na rysunku B. Żółtą podkładką wyróżniony jest „goły wzmacniacz”, a pozostałe elementy ustalają warunki pracy tego wzmacniacza. Na wejściu wzmacniacza pracuje para różnicowa z tranzystorami NPN T1, T2. Od strony emitera podłączona jest do źródła prądowego, czy raczej lustra prądowego z tranzystorem T3. Prąd tego lustra, a więc i sumaryczny prąd T1 i T2 jest wyznaczony przez rezystor R1. Od strony kolektorów para różnicowa jest obciążona lustrem prądowym zbudowanym z diody D2 i tranzystora T4. Dzięki obecności tego lustra prądowego można uzyskać bardzo duże wzmocnienie napięciowe, ale pod warunkiem, że rezystancja zewnętrznego obciążenia tego stopnia też będzie bardzo duża. Aby była jak największa, następnym stopniem wzmacniającym jest nie pojedynczy tranzystor, tylko układ Darlingtona z tranzystorami T5, T6. Wzmocniony w tym stopniu sygnał jest podawany na symetryczny wtórnik z tranzystorami T7, T8, który zapewnia stosunkowo dużą wydajność prądową wyjścia. Dzięki spadkowi napięcia na diodach D3, D4 w spoczynku przez tranzystory T7, T8 płynie niewielki prąd, co jest korzystne.

Przetwornikiem jest tu mikrofon elektretowy ME, standardowo polaryzowany przez rezystor R14. Z kolei dzielnik R12, R13 ustala napięcie stałe w punktach A, B, C wzmacniacza. Ponieważ ten układ jest bardzo czułym wzmacniaczem, więc z uwagi na ogromne wzmocnienie zachodzi ryzyko samowzbudzenia między wyjściem a wejściem. Przy zbyt dużym wzmocnieniu samowzbudzenie układu nastąpi wskutek przenikania sygnału z wyjścia na wejście wzmacniacza, a konkretnie dźwięku na drodze ze słuchawek do mikrofonu przez powietrze. Aby to zminimalizować, nale-

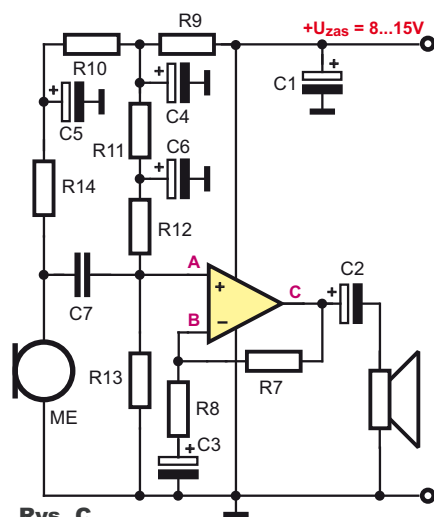
ży oddalić słuchawki od mikrofonu. Ale samowzbudzenie może też nastąpić wskutek przechodzenia sygnału przez obwód zasilania. Aby temu zapobiec, w układzie mamy rozbudowane filtry w obwodach wejściowych (R9C4, R10C5 i R11C6)

Wzmocnienie sygnałów zmiennych jest wyznaczone przez stosunek rezystorów R7 i R8. Można łatwo regulować wzmocnienie, zmieniając wartość R8 w zakresie 22Ω...2,2kΩ. U mnie, z dobrymi słuchawkami, optymalna wartość R8 wyniosła 220Ω – przy mniejszej wartości R8 układ miał wprawdzie większą czułość, ale się wzbudzał. Wypróbowałem też pracę z rezystorem R8 = 22Ω – dało to ogromną czułość, ale układ trzeba było wystawić na parapet, zamknąć okno i dopiero wtedy przestał się wzbudzać. Uzyskiwany efekt był wtedy zadziwiający.

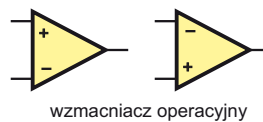
Wykonaj taki układ i przetestuj. A pod koniec tego wykładu przedstawię ci propozycję budowy pokrewnej wersji *Whispera*. Jeśli potraktujemy nasz „goły wzmacniacz” wyróżniony żółtą podkładką jako „żółtą skrzynkę”, to schemat naszego podsłuchu będzie wyglądał jak na rysunku C.

### Poznajemy elementy i układy elektroniczne

**Uniwersalny wzmacniacz.** W wcześniejszych wykładach dowiedzieliśmy się wiele o wzmacnianiu, ale przekonaliśmy się też o bardzo poważnym problemie zmian termicznych. Omawiane w poprzednim wykładzie wzmacniacze w konfiguracjach OE, OB, OC i ich kombinacje przeznaczone były do wzmacniania niewielkich sygnałów *zmiennych*. Poradziłyśmy sobie z problemem zmian termicznych przy wzmacnianiu sygnałów zmiennych, stosując lokalne ujemne sprzężenie zwrotne. Jednak uzyskiwana stabilność punktów pracy jest niewystarczająca do wzmacniania małych sygnałów *stałych* (np. w układach pomiarowych czy automatyki przemysłowej). W każdym razie zauważyliśmy, że ujemne sprzężenie zwrotne redukując wzmocnienie, poprawia inne ważne parametry. Ten fakt



Rys. C



wzmacniacz operacyjny

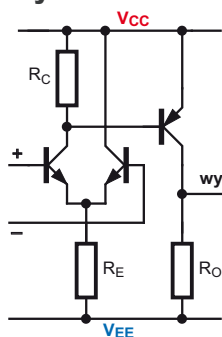
Rys. 1

bardzo często wykorzystujemy – używamy szczególnego rodzaju wzmacniaczy o bardzo dużym wzmocnieniu. I właśnie budując układ z fotografii tytułowej i rysunku C „wynależliśmy”...

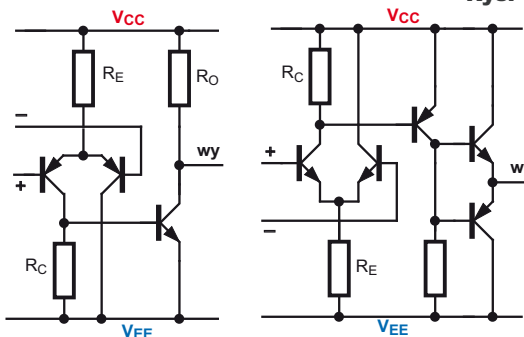
**Wzmacniacz operacyjny.** Jest to podstawowa, nieprawdopodobnie uniwersalna „cegiełka”, stosowana do budowy najróżniejszych układów analogowych. Nazwa pochodzi stąd, że wzmacniacze takie pierwotnie służyły do przeprowadzania operacji matematycznych w komputerach analogowych. Potem znalazły wiele innych zastosowań.

Symbol wzmacniacza operacyjnego, bez zaznaczonych obwodów zasilania, pokazany jest na rysunku 1 – dwie wersje są jednakowe, dla wygody rysowania schematów zamienione miejscami są tylko oznaczenia wejść (plus i minus). Wzmacniacz operacyjny ma dwa wejścia i **wzmacnia tylko różnicę napięć między tymi wejściami, natomiast praktycznie nie ma znaczenia napięcie wspólne na obu wejściach**. Wzrost napięcia na wejściu „dodatnim”, nieodwracającym, powoduje wzrost napięcia na wyjściu – stąd znaczek plus na wejściu. Wzrost napięcia na wejściu „ujemnym”, odwracającym powoduje zmniejszanie napięcia wyjściowego – stąd znaczek minus. Współczesny wzmacniacz operacyjny ma ogromne różnicowe wzmocnienie napięciowe. Wynosi ono setki tysięcy, a w niektórych typach wzmacniaczy nawet ponad milion razy, czyli ponad 120dB. Oznacza to, że do dużej zmiany napięcia wyjściowego wystarczą zmiany napięcia między wejściami rzędu mikrowoltów, czyli milionowych części volta!

Rys. 2



Rys. 3



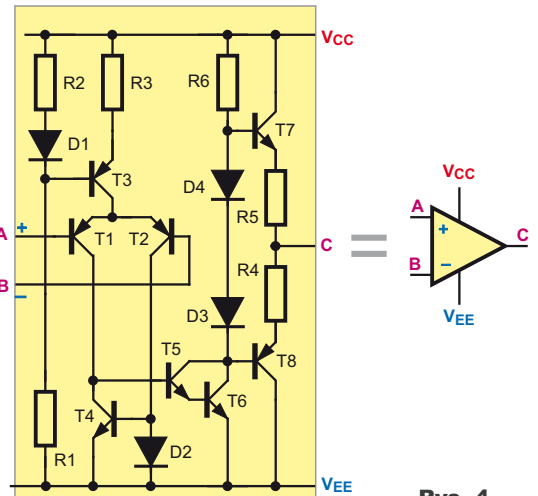
Nieodłącznym składnikiem obwo-  
du wejściowego każdego wzmacniacza  
operacyjnego jest poznana w wykładzie  
piątym *para różnicowa*, która nie tylko  
wzmacnia, ale pozwala uzyskać wejście  
różnicowe, które reaguje tylko na różnicę  
sygnałów wejściowych. W najprostszym  
przypadku układ mógłby wyglądać jak na  
**rysunku 2**, tylko miałyby słabe parametry  
i małe wzmocnienie. W rzeczywistości  
na wyjściu zawsze występuje bufor, zwy-  
kle symetryczny wtórnik, co zapewnia  
dobre parametry wyjścia. W najprost-  
szym przypadku taki wyjściowy wtórnik  
– bufor można byłoby zrealizować jak na  
**rysunku 3**. W rzeczywistych wzmacnia-  
czach operacyjnych oprócz wejściowej  
pary różnicowej występuje jeden, czasami  
dwa stopnie wzmacniacza napięciowego,  
a na wyjściu zawsze pracuje jakaś odmiana  
symetrycznego bufora wyjściowego.  
Rezystory są często zastępowane źród-  
łami i lustrami prądowymi. Występują  
też dodatkowe wtórniki i inne obwo-  
dy pomocnicze. W efekcie otrzymujemy  
uniwersalny wzmacniacz o ogromnym  
wzmocnieniu różnicowym.

My, mając w zestawie EdW09 tylko  
8 tranzystorów, wykorzystaliśmy je  
wszystkie w układzie z fotografii tytu-  
łowej. Podobny „uniwersalny wzmac-  
niacz” i oparty na nim superpodzłuch  
moglibyśmy też zrealizować na wiele  
innych sposobów. Na przykład wzmac-  
niacz z rysunków B i C moglibyśmy rów-  
nie dobrze zrealizować według **rysunku 4**.  
Zwróć uwagę, że ten układ jest nie-  
jako „odwrotnością” układu tytułowego  
z rysunku B – na wejściu pracują tran-  
zystory T1, T2 typu pnp, więc prądy polary-  
zacji wejść (prądy baz pary różnicowej)  
popłyną tu w kierunku przeciwnym, niż  
w układzie tytułowym.

Tego rodzaju uniwersalne wzmacnia-  
cze są od dawna produkowane: najpierw  
z pojedynczych elementów, potem jako  
układy scalone – począwszy od roku 1963,  
gdy opracowano wzmacniacz operacyjny  
uA702, a zwłaszcza od roku 1965, kiedy

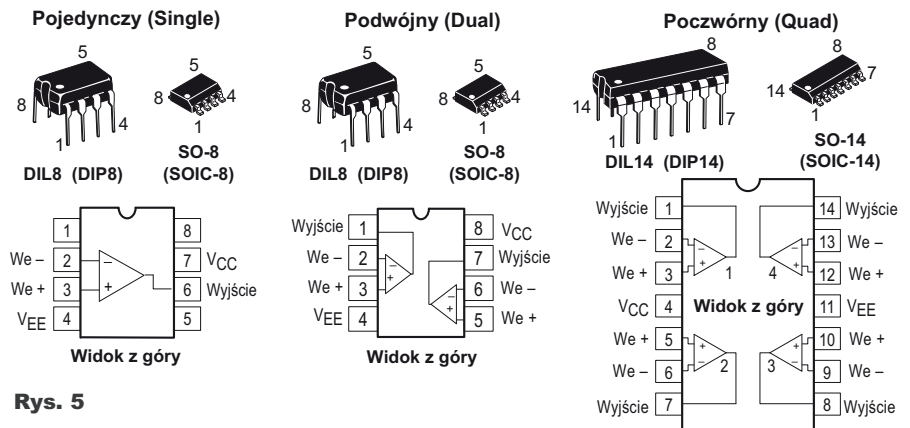
pojawił się bardzo popularny układ  
uA709. Tego rodzaju wzmacniacze  
można zrealizować na wiele sposo-  
bów. Dziś mamy do dyspozycji setki  
typów wzmacniaczy operacyjnych.  
Często wykorzystujemy też wzmac-  
niacze podwójne i poczwórne. Zapamiętaj rozmieszczenie podsta-  
wowych wyprowadzeń w scalonych  
wzmacniaczach operacyjnych pojed-  
ynczych, podwójnych i poczwór-  
nych w standardowych obudowach  
DIL – patrz **rysunek 5**. Zauważ, że  
mamy tylko dwie nóżki zasilania:  
dodatnią ( $V_{CC}$ ) i ujemną ( $V_{EE}$ ). Brak  
natomiast wyprowadzenia masy. We  
wzmacniaczach pojedynczych „nad-  
miarowe” nóżki często pozwalają  
skorygować tzw. napięcie niezrównowa-  
żenia, a czasem pozwalają na tzw. kom-  
pensację częstotliwościową.

Nasz układ scalony LM358 z zestawu  
EdW09 to podwójny wzmacniacz opera-  
cyjny, czyli z wyprowadzeniami według  
rysunku 5b. Jest to wersja opracowanej  
w 1972 roku kostki LM324, zawierającej  
cztery wzmacniacze. Schemat wewnętrzny  
pojedynczego wzmacniacza pokazany jest

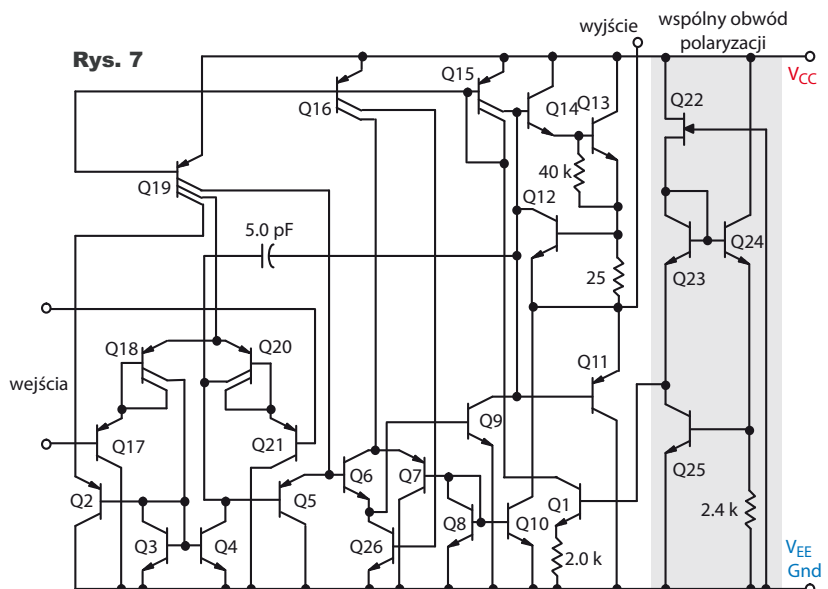
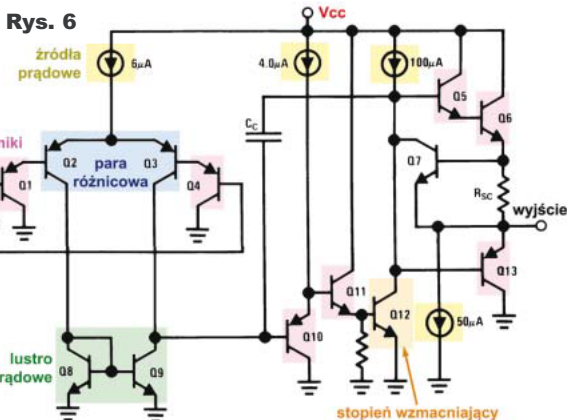


Rys. 4

w pewnym uproszczeniu na **rysunku 6**.  
Składa się on z doskonale znanych nam  
elementarnych obwodów, wyróżnionych  
kolorowymi podkładkami. Zwróć uwagę na  
duże podobieństwo z rysunkiem 4. Realizacja  
w postaci układu scalonego ma wiele  
zalet, m.in. wszystkie elementy mają jedna-  
kową temperaturę. W rzeczywistości układ  
scalony ma nieco inną budowę, niż układ  
z elementów pojedynczych – dyskretnych.



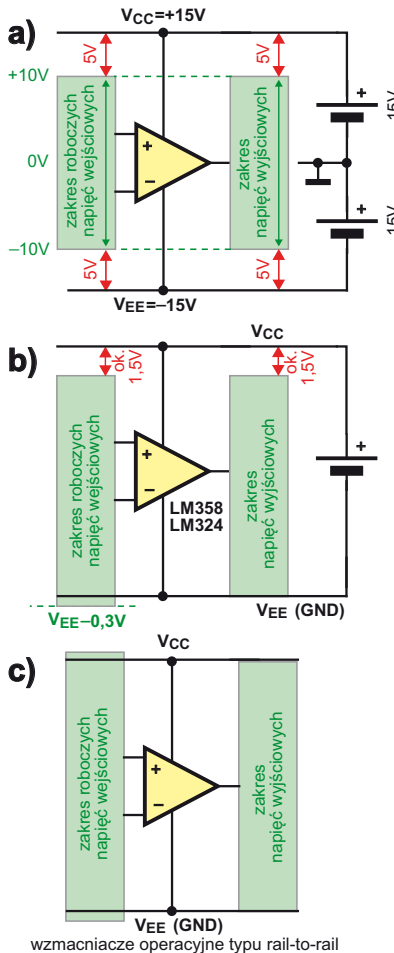
Rys. 5



Rys. 7

Dokładniejszy schemat wzmacniacza LM358 pokazany jest na rysunku 7. W szczególności nie będziemy się jednak zagłębiać.

Początkowo wzmacniacze operacyjne zasilane były napięciem symetrycznym  $\pm 15V$ , a przetwarzane sygnały użyteczne miały zakres  $\pm 10V$  względem masy. Wystarczyło, żeby wejścia i wyjścia wzmacniaczy operacyjnych prawidłowo pracowały w zakresie napięć wejściowych i wyjściowych  $\pm 10V$ , co zilustrowane jest zielonymi podkładkami na rysunku 8a. Pozostawał bezpieczny margines 5V od każdej z szyn zasilania. Z czasem, wzmacniacze operacyjne częściej pracowały w innych zastosowaniach, przy zasilaniu napięciem pojedynczym, coraz niższym. Pożądane stały się wzmacniacze, których wejścia i wyjścia mogły pracować w jak najszerszym zakresie napięć. A tu wszystko zależy od szczegółów budowy obwodów wejściowych i wyjściowych. Nasza znana od 40 lat kostka LM358 ma taką budowę, że użyteczny zakres napięć wejściowych i wyjściowych sięga nawet nieco poniżej ujemnej szyny zasilania ( $V_{EE}$ ), która przy zasilaniu pojedynczym często pełni rolę masy – patrz rysunek 8b. Układ LM358 może być zasilany napięciem symetrycznym w zakresie  $\pm 1,5V \dots \pm 16V$  albo pojedynczym  $3V \dots 32V$ . Obecnie, w związku z tendencją do obniżania napięć zasilają-



wzmacniacze operacyjne typu rail-to-rail

Rys. 8

doskonale wzmacniacze operacyjne są genialnie uniwersalnymi „cegółkami” w układach analogowych. Obecnie dostępne są setki typów wzmacniaczy operacyjnych o bardzo różnej budowie wewnętrznej i różnych parametrach. W niektórych zastosowaniach potrzebne są wzmacniacze zasilane niskimi napięciami, nawet  $1 \dots 1,5V$  lub pobierające jak najmniej prądu (*low power*). W innych pożądane są wzmacniacze niskoszumne (*low noise*), w jeszcze innych jak najszybsze (*high speed*), w jeszcze innych jak najbardziej precyzyjne i stabilne (*precision*).

Rys. 9

MAXIMUM RATINGS ( $T_A = +25^\circ C$ , unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltages			Vdc
Single Supply	$V_{CC}$	32	
Split Supplies	$V_{CC}, V_{EE}$	$\pm 16$	
Input Differential Voltage Range	$V_{IDR}$	$\pm 32$	Vdc
Input Common Mode Voltage Range	$V_{ICR}$	-0.3 to 32	Vdc
Output Short Circuit Duration	$t_{SC}$	Continuous	
Junction Temperature	$T_J$	150	$^\circ C$
Thermal Resistance, Junction-to-Air	$R_{\theta JA}$	238	$^\circ C/W$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-55 to +125	$^\circ C$
Operating Ambient Temperature Range	LM258 LM358	-25 to +85 0 to +70	$^\circ C$

Podstawowe parametry wzmacniaczy operacyjnych to: dopuszczalny zakres napięć zasilania, zakres roboczych napięć wejściowych i wyjściowych, szybkość (SR – Slew Rate w  $V/\mu s$ ) i pasmo przenoszonych częstotliwości ( $f_T$  w MHz). W katalogach podawana jest maksymalna wydajność prądowa wyjścia, zazwyczaj kilkanaście do kilkudziesięciu mA. Bardzo ważne okazują się parametry wejść: wielkość stałego prądu polaryzacji wejść (*bias*

*current*), a także „doskonałość symetrii” wejść i wpływ temperatury.

Istnieją liczne wzmacniacze operacyjne, które na wejściu mają parę różnicową tranzystorów polowych, złączowych JFET lub MOSFET, przez co prąd polaryzacji wejść jest radykalnie mniejszy, niż w przypadku tranzystorów bipolarnych i często jest rzędu pikoamperów (bilionowych części ampera). Podstawowym problemem w układach precyzyjnych są zmiany temperatury. Temperatura na przykład zmienia prąd polaryzacji wejść, w tranzystorach bipolarnych w niewielkim stopniu, ale w tranzystorach polowych – relatywnie dużo, co najmniej dwukrotnie na każde 10 stopni. Ponadto prądy polaryzacji obu wejść nie są identyczne, dlatego w katalogach, oprócz wielkości prądu polaryzacji (*bias current*) podaje się też wartość spodziewanej różnicy dwóch prądów wejściowych – *wejściowy prąd niezrównoważenia* (*offset current*). Ogromnie ważną sprawą jest wspomniana „doskonałość symetrii”. Niestety, idealnej symetrii obwodów wejściowych osiągnąć nie można, a to owocuje błędem, znanym jako *wejściowe napięcie niezrównoważenia*, inaczej napięcie offsetu – przesunięcia (*offset voltage*). Jak już wiemy, przy wzmacnieniu rzędu setek tysięcy, a nawet miliona, do zmiany napięcia na wyjściu o 1V wystarczy *zmiana* napięcia między wejściami o jeden do kilku mikrowoltów. Teoretycznie oba tranzystory wejściowej pary różnicowej powinny być identyczne, czyli do uzyskania jednakowych prądów tranzystorów pary różnicowej i zerowego napięcia na wyjściu, napięcie między wejściami powinno być równe zero. Teoretycznie... Natomiast w praktyce, z uwagi na „niedoskonałości symetrii”, do uzyskania zerowego napięcia na wyjściu (ogólnie by umożliwić liniową pracę wyjścia) potrzebne jest jakieś niezerowe napięcie między wejściami, zwane właśnie wejściowym napięciem niezrównoważenia – napięciem offsetu. W popularnych wzmacniaczach operacyjnych wynosi ono od jednego do kilku miliwoltów, a precyzyjnych, znacznie mniej. Podczas normalnej pracy niejako na tle tego napięcia offsetu występują drobne mikrowoltowe zmiany napięcia między wejściami. Co istotne, napięcie offsetu zmienia się z temperaturą. Dlatego w katalogach oprócz *napięcia niezrównoważenia* (*offset voltage*), podaje się też *dryft cieplny napięcia niezrównoważenia* (*offset voltage drift*), zwykle wynoszący kilka mikrowoltów na stopień Celsjusza. Tu po pierwsze trzeba uspokoić, że w praktyce wcale nie trzeba podawać między wejścia jakiegoś małego napięcia offsetu – ustawi się ono tam

samo. Po drugie problem napięcia niezrównoważenia dotyczy tylko niektórych zastosowań – niemniej trzeba o tym wiedzieć. **Rysunek 9** pokazuje fragmenty karty katalogowej (Motorola) naszego wzmacniacza LM358 – niektóre wartości dopuszczalne (*Maximum ratings*). Z kolei **rysunek 10** z katalogu firmy ST pokazuje podstawowe parametry robocze. Zwróć uwagę, że podane są zarówno spodziewane wartości typowe (Typ.) oraz gwarantowane dla wszystkich egzemplarzy (Max, Min).

W następnych wykładach poznamy wiele zaskakujących zastosowań wzmacniaczy operacyjnych. W zdecydowanej większości wykorzystujemy dobroczynne skutki ujemnego sprzężenia zwrotnego z wyjścia na wejście odwracające („ujemne”). Sprzężenie takie zmniejsza wzmocnienie, ale za to poprawia liczne inne parametry. Zgodnie z regułą „coś za coś”, czym większa jest redukcja wzmocnienia, tym bardziej poprawione są inne parametry. W obszerną teorię nie będziemy się zagłębiać. Na razie omówimy podstawowe układy pracy. Najprostszym jest...

**Wtórnik.** Wystarczy połączyć wyjście z wejściem odwracającym („ujemnym”) według **rysunku 11a**, by otrzymać wtórnik – bufor o wzmocnieniu równym jedności. Wiemy, że w związku z ogromnym wzmocnieniem napięciowym wzmacniacza operacyjnego, do uzyskania na wyjściu zmian rzędu kilku woltów, wystarczą zmiany napięcia różnicowego między wejściami rzędu mikrowoltów, praktycznie niemierzalne. Podanie z zewnątrz napięcia na wejście nieodwracające (A) spowoduje taką reakcję wyjścia, żeby napięcie na drugim wejściu (B) było praktycznie takie same. Można uznać, że napięcia w punktach A i B są jednakowe. Teoretycznie z dokładnością do mikrowoltów.

W rzeczywistości występuje tam różnica równa wejściowemu napięciu niezrównoważenia (wg rys. 10 dla LM358 typowo 2mV, maksymalnie do 9mV).

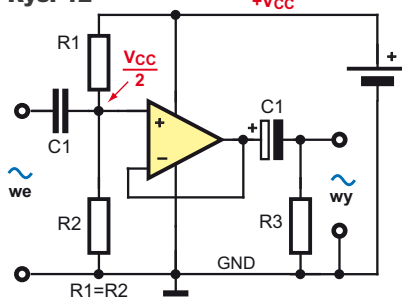
Choć **przy analizie działania często zakładamy, że prądy wejściowe są równe zeru, jednak trzeba pamiętać, że zawsze trzeba zapewnić przepływ niewielkich stałych prądów polaryzacji wejść**. Ponieważ w LM358 stały prąd polaryzacji wejść (typowo  $I_B = 20\text{nA}$ ,

- napięcie niezrównoważenia
- drift napięcia niezrównoważenia
- prąd polaryzacji wejść
- wejściowy prąd niezrównoważenia
- drift prądu niezrównoważenia
- wzmocnienie (maksymalne)
- poбір prądu
- roboczy zakres napięć wejściowych
- wydajność prądowa wyjścia
- prąd wypływający
- prąd wpływający
- zakres napięć wyjściowych
- szybkość wyjścia
- iloczyn wzmocnienia i pasma zniekształcenia
- szumy

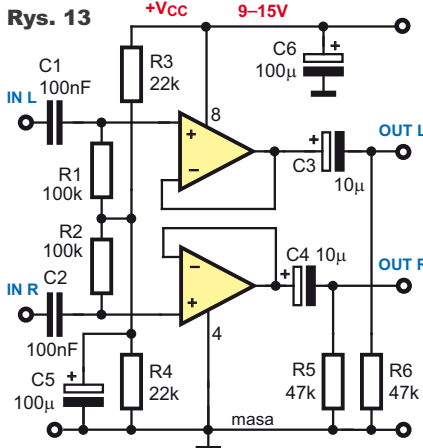
Rys. 10

maksymalnie 0,2uA) wypływa z wejść, więc w układzie z **rysunku 11b** na rezystorze R1 wejściowym występuje spoczynkowe napięcie stałe ( $U=I_B \cdot R1$ ). Wtórnik pracuje prawidłowo zarówno przy sygnałach stałych, jak i zmiennych, w zakresie napięć wyjściowych zaznaczonym kolorem zielonym na rysunku 8b. Takie wtórniki mają parametry zdecydowanie lepsze

Rys. 12



Rys. 13

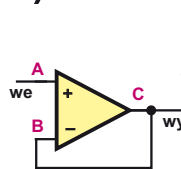


ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_{CC} = +5V, V_O = 1.4V, T_{amb} = +25^\circ C$  (unless otherwise specified)

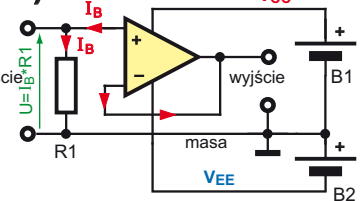
Parameter	LM158-LM258 LM358			Unit	
	Min.	Typ.	Max.		
$V_{io}$ Input Offset Voltage		2	9	mV	
$DV_{io}$ Input Offset Voltage Drift		7	30	$\mu V/^\circ C$	
$I_{ib}$ Input Bias Current		20	150	nA	
$I_{io}$ Input Offset Current		2	30	nA	
$DI_{io}$ Input Offset Current Drift		10	300	$pA/^\circ C$	
$A_{vd}$ Large Signal Voltage Gain		50	100	V/mV	
$I_{CC}$ Supply Current, all Amp, no load		0.7	1.2	mA	
$V_{icm}$ Input Common Mode Voltage Range		0	0	V	
$I_{source}$ Output Current Source		20	40	60	mA
$I_{sink}$ Output Sink Current		10	20	50	mA
$V_{OPP}$ Output Voltage Swing		0	0	V	
SR Slew Rate		0.3	0.6	V/ $\mu s$	
GBP Gain Bandwidth Product		0.7	1.1	MHz	
THD Total Harmonic Distortion			0.02	%	
$e_n$ Equivalent Input Noise Voltage				nV/ $\sqrt{Hz}$	

a)

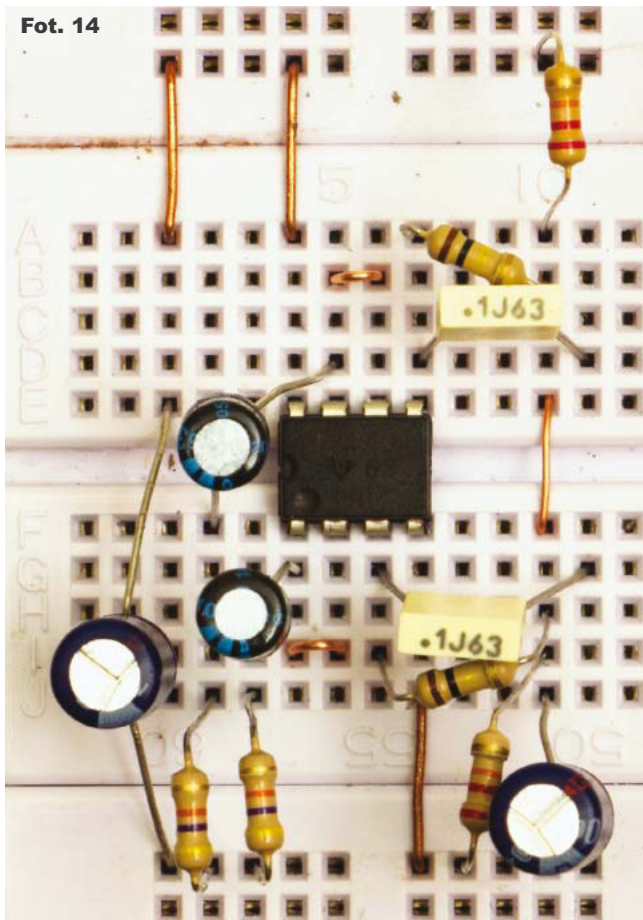


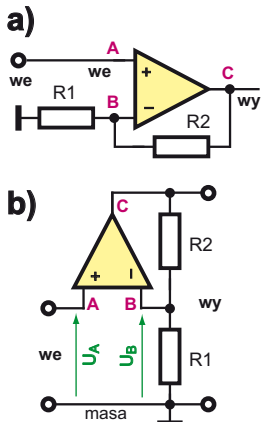
Rys. 11

b)



Fot. 14



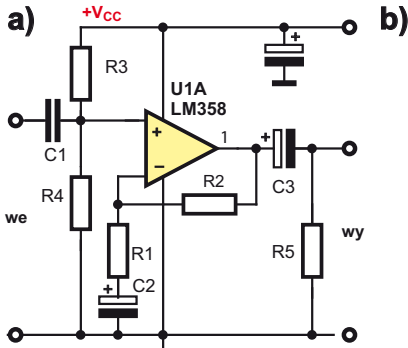


Rys. 15

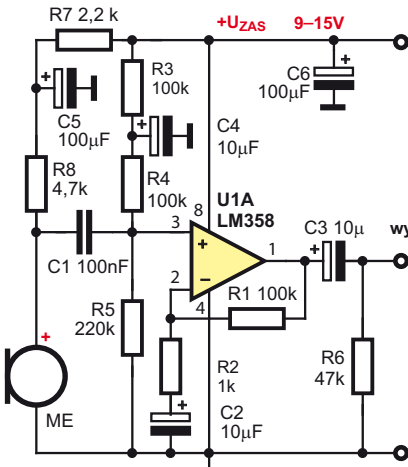
od prostego wtórnika z jednym tranzystorem (pomijając kwestię szybkości): mają bardzo dużą rezystancję wejściową, praktycznie równą rezystancji R1 i znikomo małą rezystancję wyjściową. Aby wzmacniać przebiegi zmienne, których napięcie spada poniżej potencjału masy, należy albo zasilić układ napięciem symetrycznym względem masy według rysunku 11b, albo dodać obwód zapewniający pracę na poziomie połowy napięcia zasilania – prosty przykład na **rysunku 12**. Obwód wyjściowy C2R3 odcina składową stałą, czyli zapewnia na wyjściu napięcie stałe równe zero – potencjał masy.

Jeśli chcesz, możesz zbudować stereofoniczny wtórnik według **rysunku 13** i **fotografii 14**. Dla sygnałów zmiennych ma on rezystancję wejściową równą wartościom R1 i R2.

**Wzmacniacz nieodwracający.** Bardzo popularna konfiguracja wzmacniacza napięć stałych i zmiennych pokazana jest na **rysunku 15a**. Dla łatwiejszej analizy warto go przedstawić jak na **rysunku 15b**. Można powiedzieć, że jest to wtórnik z dodatkowym dzielnikiem w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego, więc też ma bardzo dużą rezystancję wejściową. Znowu pamiętamy, że do dużych zmian napięcia wyjściowego, wystarczy znikomo mała zmiana różnicy napięć między punktami A, B. Po podaniu napięcia na wejście (punkt A), na wyjściu C wystąpi takie napięcie, żeby  $U_B = U_A$ . Tym samym stopień podziału dzielnika R1, R2



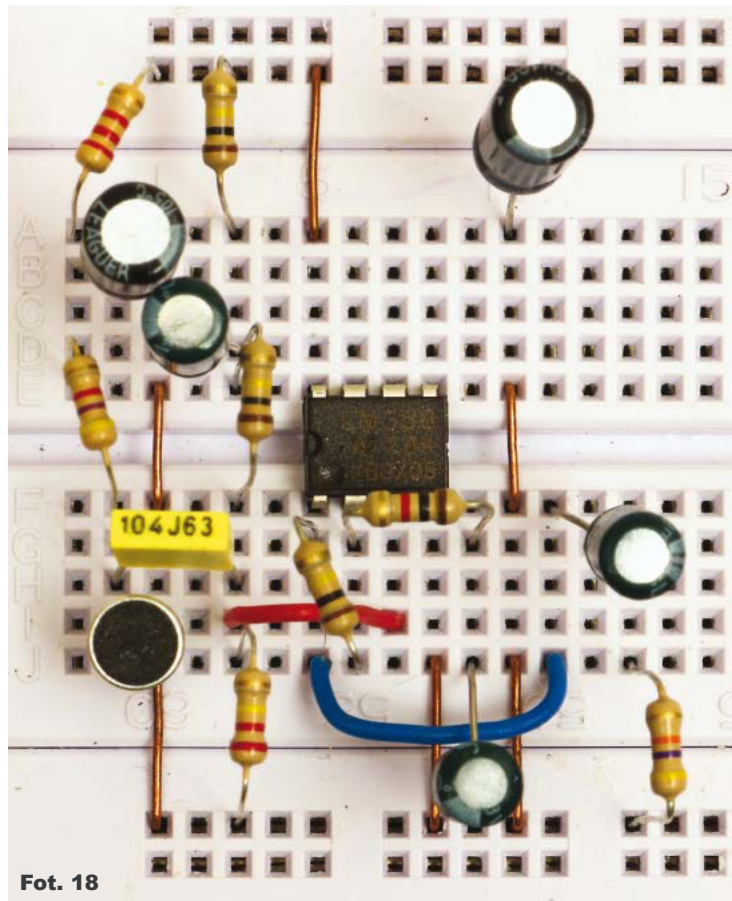
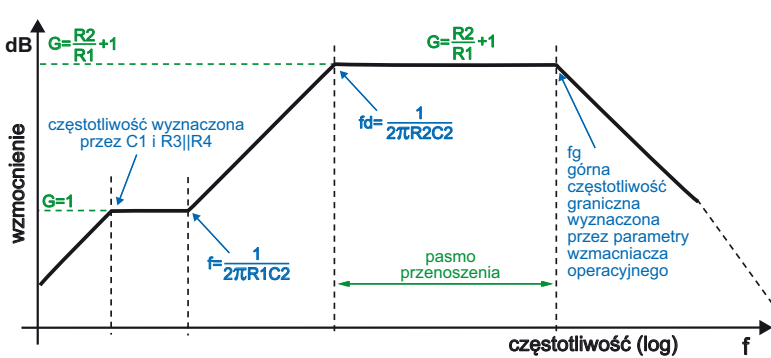
Rys. 16



Rys. 17

wyznacza wzmocnienie:  $U_C/U_A = G = R2/R1 + 1$ .

Jeśli przy zasilaniu napięciem pojedynczym chcemy wzmacniać napięcia zmienne, trzeba zapewnić pracę na poziomie połowy napięcia zasilania i dodać kondensator w obwodzie rezystorów sprzężenia zwrotnego według **rysunku 16a**. Tu dla napięć stałych i wolnozmiennych kondensator C2 stanowi przerwę, więc układ jest wtedy wtórnikiem o wzmocnieniu

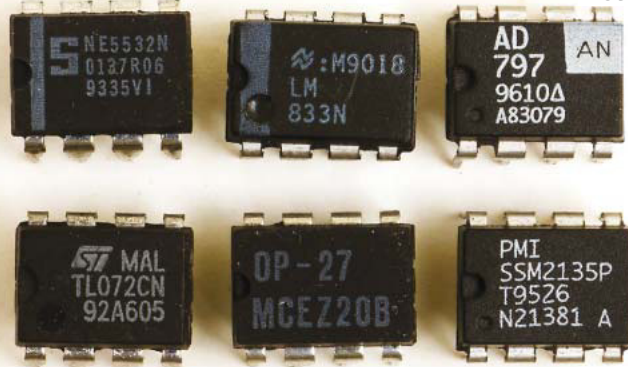


Fot. 18

1, czyli 0dB, natomiast dla przebiegów zmiennych, gdy C2 ma małą reaktancję (praktycznie stanowi zwarcie), wzmocnienie wyznaczają rezystory ujemnego sprzężenia zwrotnego i wynosi ono  $G$

**Fot. 19** =  $1 + R2/R1$ . **Rysunek 16b** pokazuje charakterystykę częstotliwościową i częstotliwości charakterystyczne.

Możesz zbudować wzmacniacz mikrofonowy według **rysunku 17** (porównaj z rysunkiem C na wstępie tego wykładu). Wykorzystujesz jeden z dwóch wzmacniaczy kostki LM358, drugi może zostać niepodłączony. Mój model pokazany jest na **fotografii 18**. Jednak nasz wzmacniacz LM358 jest



powolny i nie jest optymalizowany do zastosowań audio. W przedwzmacniaczu mikrofonowym należałoby raczej wykorzystać inną, lepszą kostkę, choćby podwójny wzmacniacz operacyjny NE5532, TL072 lub inny podwójny lub pojedynczy wzmacniacz wysokiej jakości – przykłady na fotografii 19.

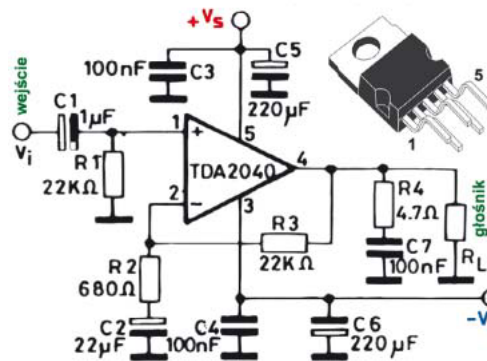
Warto wiedzieć, że wiele scalonych wzmacniaczy mocy audio jest „specjalizowanymi wzmacniaczami operacyjnymi o dużej mocy”, pracującymi w konfiguracji nieodwracającej.

**Rysunek 20** pokazuje katalogowe schematy aplikacyjne popularnych wzmacniaczy mocy TDA2040 i TDA2050. W konfiguracji nieodwracającej pracują też słynne wzmacniacze mocy wysokiej jakości typu TDA7294 oraz LM3886.

**Wzmacniacz odwracający.**

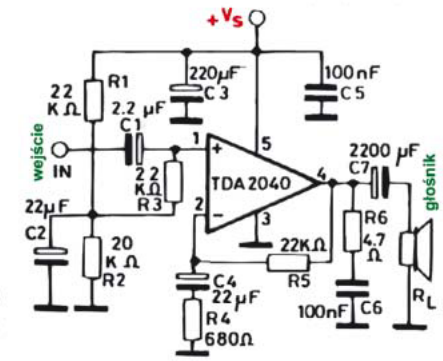
Na pozór dziwna konfiguracja z **rysunku 21a** okazuje się genialnie uniwersalna. Wejście nieodwracające („dodatnie”) jest tu na stałe dołączone do masy. Znow pamiętamy, że do zmiany napięcia na wyjściu, wystarczą znikome zmiany na wejściu odwracającym („ujemnym”), rzędu mikrowoltów. Przykładowo jeżeli podamy na wejście X napięcie dodatnie  $U_1$ , to popłynie prąd  $I_1$ . Pomijamy teraz małe prądy wejściowe wzmacniacza – cały prąd  $I_1$  płynie przez rezystor  $R_2$  i dalej wpływa do wyjścia wzmacniacza i dalej do ujemnej szyny zasilania. Ilustruje to **rysunek 21b**. W związku z tym rezystancja wejściowa jest równa  $R_1$ . Napięcie wyjściowe  $U_2$  przyjmie taką wartość, żeby zachować w punkcie B napięcie równe zero – to nie żadna magia czy zdolność przewidywania, tylko efekt ujemnego sprzężenia zwrotnego z wyjścia na wejście odwracające. Gdyby bowiem napięcie na wejściu odwracającym, w punkcie B było zbyt wysokie (dodatnie), to na wyjściu pojawiłoby się duże napięcie ujemne, które „ściągnęłoby punkt A niżej”. Gdyby z kolei napięcie w punkcie A było zbyt niskie (ujemne), to napięcie wyjściowe by wzrosło. W warunkach normalnej, liniowej pracy właśnie dzięki ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu **wzmacniacz samoczynnie dąży do wyrównania napięć na wejściach i napięcie w punkcie B jest równe potencjałowi masy**. Mówimy więc, że punkt B to *masa wirtualna*.

zasilanie napięciem symetrycznym



Rys. 20

zasilanie napięciem pojedynczym

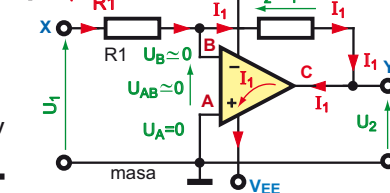


a)

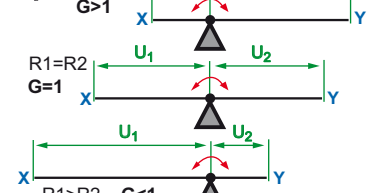


Rys. 21

b)



c)



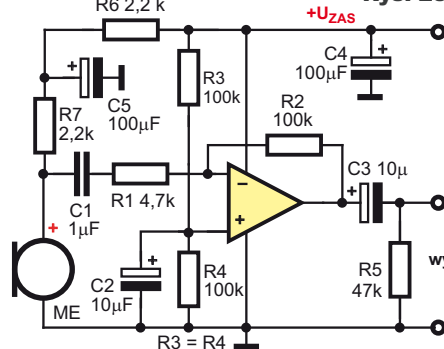
Napięcia na rezystorach ( $U_{R1}=U_{we}$ ,  $U_{R2}=U_{wy}$ ) są wprost proporcjonalne do ich rezystancji. A to oznacza, że wzmacnienie wynosi  $G = -R_2/R_1$ . Znak minus pokazuje, że jest to **wzmacniacz odwracający**, gdzie wzrost napięcia na wejściu X powoduje zmniejszanie napięcia na wyjściu Y. Wzmacniacz odwracający możemy wyobrazić sobie jako dziecięcą

huśtawkę – dźwignię, ze środkami obrotu w punkcie B, o długościach ramion wyznaczonych przez rezystancje  $R_1, R_2$  – **rysunek 21c**. We wzmacniaczu nieodwracającym minimalne wzmocnienie wynosi 1, a tu, we wzmacniaczu odwracającym może wynosić zero – wystarczy zmniejszyć rezystancję  $R_2$  do zera.

W praktyce dość często wykorzystujemy wersję „zmiennoprądową” według **rysunku 22a**. Przy małych częstotliwościach reakcja kondensatora  $C_1$  jest duża i wzmocnienie całości – małe. Jak pokazuje charakterystyka z **rysunku 22b**, w paśmie przenoszenia, czyli powyżej częstotliwości  $f_d = 1 / 2\pi R_1 C_1$ , wzmocnienie wynosi  $G = -R_2/R_1$ . Górną częstotliwość graniczną ( $f_g$ ) wyznaczają właściwości (szybkość) wzmacniacza operacyjnego, ale w razie potrzeby można ją obniżyć, dołączając pojemność  $C_2$ . Wartość  $R_2$  zwykle wynosi 10kΩ...220kΩ.

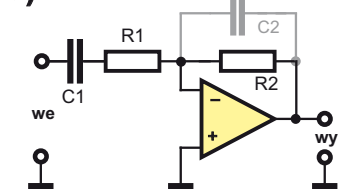
Przy zasilaniu napięciem pojedynczym trzeba zapewnić pracę na poziomie połowy napięcia zasilania. Możesz w ten sposób wykonać wzmacniacz odwracający do mikrofonu elektretowego według **rysunku 23** i **fotografii 24**, przy czym do zastosowań praktycznych zamiast LM358 należałoby zastosować szybszy wzmacniacz, np. podwójny TL072 lub pojedynczy TL071. W razie potrzeby można zmienić wartość  $R_2$  w zakresie 22kΩ...220kΩ. W każdym razie wartość rezystora  $R_1$  nie powinna być mniejsza od 2,2kΩ. I właśnie

Rys. 23

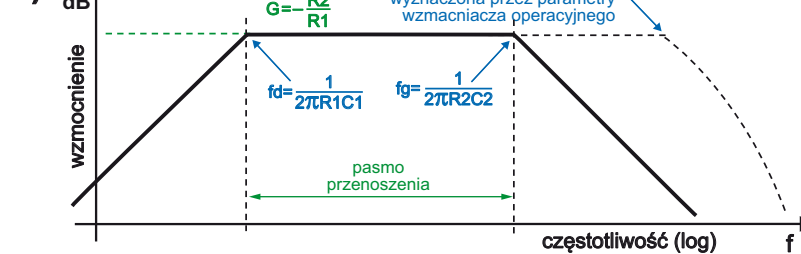


Rys. 22

a)

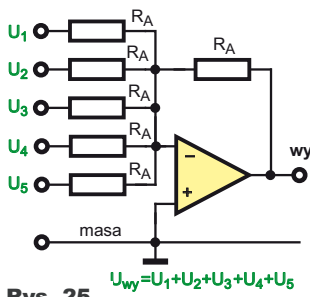


b)



z uwagi na ograniczenia związane z rezystancją R1, we wzmacniaczach mikrofonowych zdecydowanie częściej wykorzystujemy konfigurację nieodwracającą według rysunków 15–17.

Natomiast wzmacniacz w konfiguracji odwracającej możesz wykonać do wielu innych pożytecznych celów, np. w torach sygnałów audio. A na marginesie: nie obawiaj się, że wzmacniacz ma wzmocnienie ujemne, czyli że odwraca fazę przebiegu zmiennego – w układach audio nie ma to żadnego znaczenia, byle tylko tory w układach wielokanałowych (stereo) były jednakowe.



Rys. 25

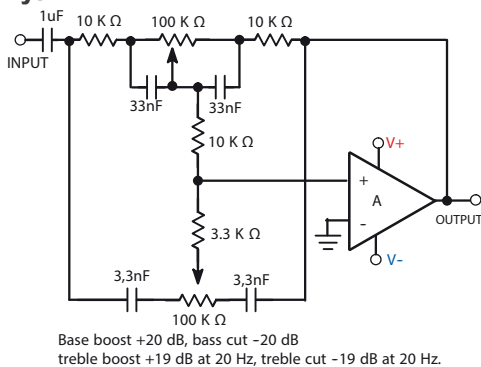
Wzmacniacz Rys. 26

odwracający jest też znakomitym sumatorem. Możesz wykonać i praktycznie wykorzystać sumator, czyli mikser audio ze wzmacniaczem. Idea pokazana jest na rysunku 25. Praktyczny mikser, zasilany napięciem pojedynczym możesz zbudować według rysunku 26. W miejsce rezystora R2 można wstawić potencjometr, co pozwoli regulować wzmocnienie sumy sygnałów od zera. Dla prawidłowej regulacji głośności, powinien to być potencjometr o tzw. charakterystyce wykładniczej, a nie liniowej.

Na bazie wzmacniacza odwracającego mógłbyś wykonać korektor – regulator barwy dźwięku, na przykład według rysunku 27 (wg katalogu On Semi). Nie zrobimy tego, ponieważ w zestawie EdW09 nie mamy ani jednego potencjometru.

A jeśli mowa o korektorach, to do odtwarzania czarnych płyt winylowych potrzebny jest wzmacniacz korekcyjny o tak zwanej charakterystyce RIAA. Rysunek 28 pokazuje dwa przykłady realizacji takiego przedwzmacniacza (z katalogu Texas Instruments). Poznane w poprzed-

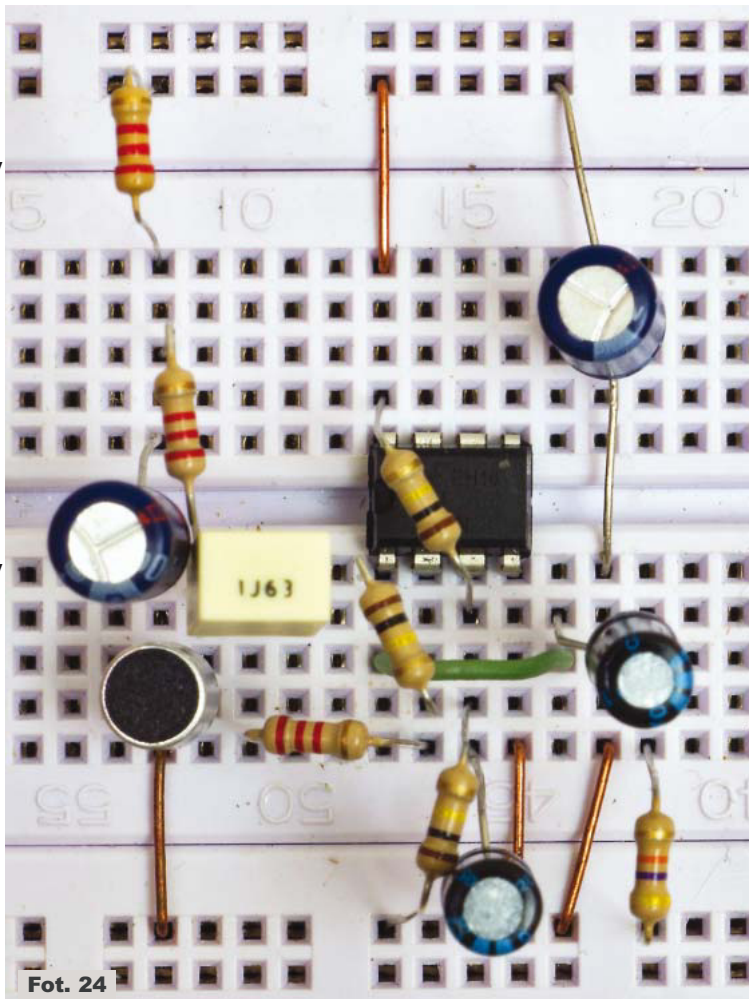
Rys. 27



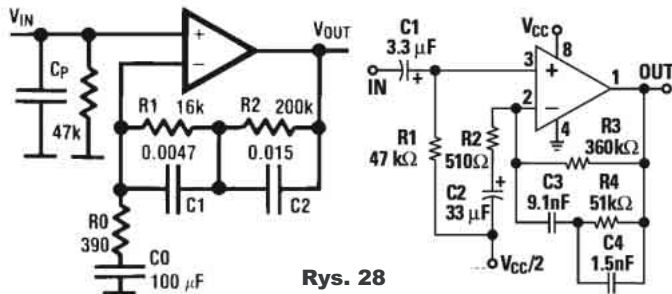
nim odcinku układy sztucznej indukcyjności najczęściej są realizowane z wtórnymi scalonymi według rysunku 29 i stworzone z nich obwody rezonansowe pracują w wielopasmowych korektorach graficznych – equalizerach.

O m ó w i o n e w tym wykładzie propozycje układowe można z powodzeniem wykorzystywać w urządzeniach audio. Przykładowy schemat blokowy jednego kanału bardziej rozbudowanego wzmacniacza – miksera pokazuje rysunek 30.

A teraz wróćmy do „superpodszluchu” z projektu tytułowego. Można go z jeszcze lepszym skutkiem zrealizować ze scalonymi wzmacniaczami

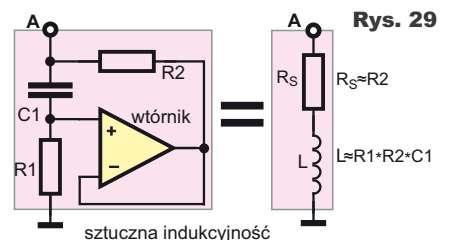


Fot. 24



Rys. 28

operacyjnymi z kostki LM358. Jeszcze bardziej czuły układ podszluchowy mógłby wyglądać jak na rysunku 31 i fotografii 32. W roli filtra wrażliwych obwodów polaryzacji tym razem pracuje tranzystor T3. Kondensator C4 nie pozwala na gwałtowne zmiany napięcia na bazie, a tym samym na jego emiterze, więc napięcie do

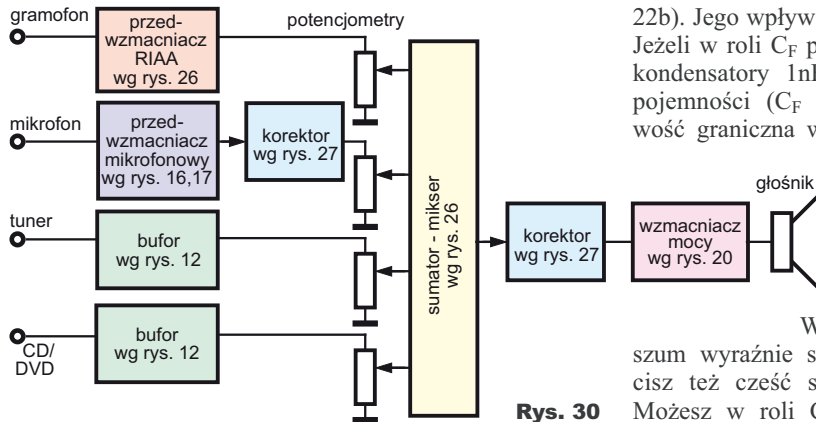


Rys. 29

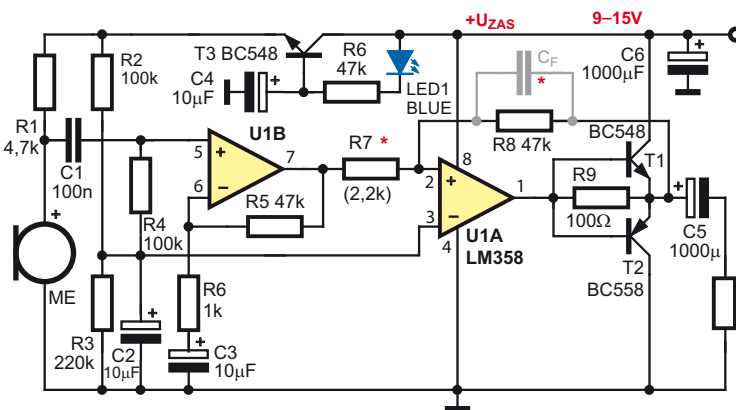
zasilania mikrofonu oraz obwodu sztucznej masy (R2, R3, C2) jest dobrze odfiltrowane.

W torze sygnału mamy połączone kaskadowo dwa wzmacniacze z kostki LM358. Wzmacniacz U1B pracuje w konfiguracji nieodwracającej. Jego wzmocnienie ustalone jest przez stosunek rezystancji R5/R6 na około 48x (33,6dB) i nie będziemy go zmieniać. Układ U1A pracuje jako wzmacniacz odwracający. W związku z małą wydajnością prądową wyjścia wzmacniacza operacyjnego, dodany jest prosty komplementarny wtórnik z tranzystorami T1, T2. Wzmocnienie wzmacniacza odwracającego wyznaczone jest przez stosunek R8/R7. Aby uzyskać potrzebne w naszym przypadku wzmocnienie całkowite (zależnie od parametrów mikrofonu, słuchawek), będziemy zmieniać wartość R7. Chodzi o to, żeby wzmocnienie było jak największe, ale by nie nastąpiło samowzbudzenie (pisk).

Zacznij od włożenia R7=10k $\Omega$ , a potem spróbuj wstawiać mniejsze wartości (4,7k $\Omega$ , 2,2k $\Omega$ , 1k $\Omega$ ...), aż układ się wzбудzi i nie pomoże odsuniecie mikrofonu od słuchawek. U mnie R7 = 2,2k $\Omega$ .



Rys. 30



Rys. 31

Najpierw wypróbuj układ bez pojemności  $C_F$ . Później dodaj pojemność  $C_F$  i sprawdź, jaki efekt daje ograniczenie pasma od góry, czyli obcięcie najwyższych częstotliwości. W modelu z fotografii 32 trzy połączone w szereg kondensatory 1nF mają w sumie 1/3 pojemności każdego, czyli  $C_F = 0,33\text{nF}$  i częstotliwość graniczna filtra dolnoprzepustowego wynosi około 10kHz (patrz rysunek

22b). Jego wpływ jest ledwo zauważalny. Jeżeli w roli  $C_F$  połączysz w szereg dwa kondensatory 1nF to uzyskasz połowę pojemności ( $C_F = 0,5\text{nF}$ ), a częstotliwość graniczna wyniesie około 6,8kHz.

Gdy w roli  $C_F$  równoległe do R8 włączysz jeden kondensator 1nF, otrzymasz filtr o częstotliwości około 3,4kHz.

Wtedy nieprzyjemny szum wyraźnie się zmniejszy, ale stracisz też część sygnałów użytecznych. Możesz w roli  $C_F$  włączyć dwa połączone równoległe kondensatory 1nF ( $C_F = 2\text{nF}$ ), ale wtedy stracisz znaczną część sygnałów użytecznych. Przeprowadź takie testy redukcji szumów za pomocą  $C_F$  zarówno z mikrofonem ME, jak też włączając kondensator 1 $\mu\text{F}$  zamiast lub równoległe do mikrofonu. Innym sposobem redukcji szumu byłoby zastosowanie niskoszumnego wzmacniacza operacyjnego, ale nie licz na cud: całkowite wyeliminowanie szumów nie jest możliwe, ponieważ źródłem szumu jest każdy rezystor, każdy tranzystor we wzmacniaczu, a także sam mikrofon.

Gdy zbudujesz „superpodsluch” według rysunku 31, nie demontuj go po wypróbowaniu! W projekcie tytułowym następnego wykładu wykorzystamy ten czuły wzmacniacz w zaskakujący sposób.

Piotr Górecki

Fot. 32

