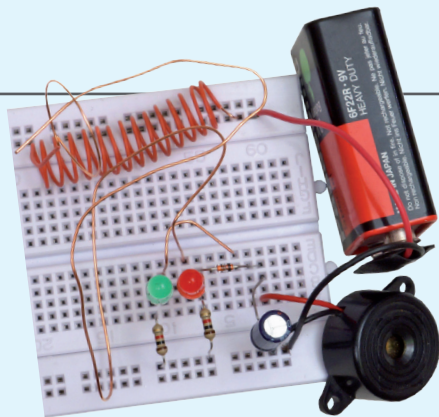




PRAKTYCZNY KURS cz. 11 ELEKTRONIKI



Oto jedenasta część PRAKTYCZNEGO KURSU ELEKTRONIKI, który zainaugurowaliśmy w MT 2/2013 i będziemy kontynuować w kolejnych wydaniach. Zainteresowanie tym kursem jest olbrzymie, dlatego zdecydowaliśmy się umożliwić czytelnikom dołączenie do kursu w dowolnym momencie. Po prostu, wszystkie poprzednie części są dla wszystkich dostępne w formacie PDF na stronie www.mt.com.pl. Można z nich korzystać w komputerze lub wydrukować sobie. Można też kupić wszystkie archiwalne numery MT na www.ulubionykiosk.pl. Publikacja każdej kolejnej części jest zawsze poprzedzona jedną stroną wstępnych informacji (jest to właśnie ta strona), żeby nowi czytelnicy mogli zapoznać się z zasadami KURSU i dołączyć do kursantów. ZAPRASZAMY!

Jeśli nie masz błędnego pojęcia o elektronice, ale chętnie byś poznał jej podstawy, to nadarza Ci się jedyna, niepowtarzalna okazja. We współpracy z bratnią redakcją miesięcznika Elektronika dla Wszystkich publikujemy w Młodym Techniku cykl fascynujących lekcji dla zupełnie początkujących. Jest to **Praktyczny Kurs Elektroniki (PKE)** z akcentem na **Praktyczny**, gdyż każda lekcja składa się z **projektu i wykładu z ćwiczeniami**, przy czym **projekt** to konkretny układ elektroniczny samodzielnie montowany i uruchamiany przez „kursanta”. Pewnie myślisz sobie – pięknie, ale jak ja mam montować układy nie mając lutownicy ani żadnych części elektronicznych. Otóż jest rozwiązanie. Lutownicy nie będziesz w ogóle używać, gdyż wszystkie układy będą montowane na **plytce stykowej**, do której wkłada się „nóżki” elementów na wcisk.

I rzecz najważniejsza! Wydawnictwo AVT przygotowało zestaw **EdW09**, zawierający płytkę stykową i wszystkie elementy, jakie będą potrzebne do wykonania kilkunastu projektów zaplanowanych w PKE. Zestaw **EdW09** można kupić w sklepie internetowym www.sklep.avt.pl lub w sklepie firmowym AVT (Warszawa, ul. Leszczyńska 11) – cena brutto 47 zł.

Ale Ty nie musisz kupować! Dostaniesz ten zestaw **za darmo**, jeśli jesteś prenumeratorem MT lub wykupisz wkrótce prenumeratę. Wystarczy wysłać na adres: prenumerata@avt.pl dwa zdania:

„Jestem prenumeratorem MT i zamawiam bezpłatny zestaw EdW09. Mój numer prenumeraty:

Jeśli otrzymamy to zamówienie przed 30 grudnia 2013 roku, to zestaw **EdW09** wyślemy Ci w połowie stycznia 2014 wraz z lutownicym numerem MT.

Uwaga uczniowie!

Szkoły prenumerujące MT otrzymują **Pakiety Szkolne PS EdW09**, zawierające po **10 zestawów EdW09** (każdy zestaw EdW09 zawiera komplet elementów z płytką stykową) skalkulowane na zasadach non profit w promocyjnej cenie 280 zł brutto za jeden pakiet PS EdW09 (tj. z rabatem 40% – 28 zł brutto za pojedynczy zestaw EdW09, którego cena handlowa wynosi 47 zł). Upewnij się, czy Twoja szkoła prenumeruje MT (niemal wszystkie szkoły ponadpodstawowe i wiele podstawowych otrzymują MT w prenumeracie sponsorowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego) i przekazaj nauczycielom informację o **Praktycznym Kursie Elektroniki** z promocyjnymi dostawami **Pakietów Szkolnych PS EdW09** do ćwiczeń praktycznych.

Zestaw EdW09 zawiera następujące elementy (specyfikacja rodzajowa):

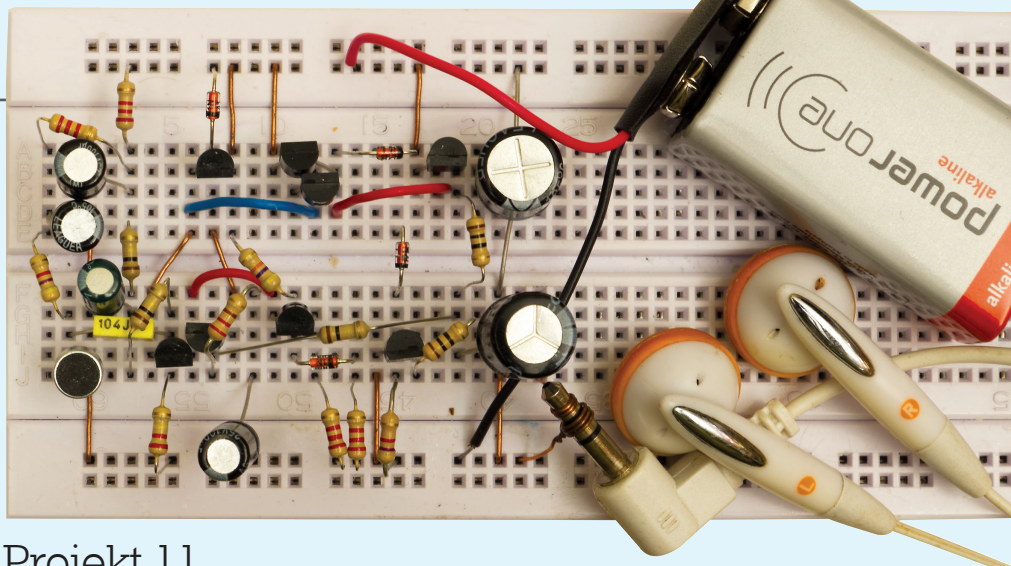
1. Diody prostownicze	4 szt.
2. Układy scalone	4 szt.
3. Tranzystory	8 szt.
4. Fotorezystor	1 szt.
5. Przekaznik	1 szt.
6. Kondensatory	22 szt.
7. Mikrofon	1 szt.
8. Diody LED	11 szt.
9. Przewód	1 m
10. Mikroswitch	2 szt.
11. Piezo z generatorem	1 szt.
12. Rezystory	64 szt.
13. Srebrzanka	1 odcinek
14. Zatrask do baterii 9V	1 szt.
15. Płytki stykowe prototypowa	1 szt.
840 pól stykowych	1 szt.

Cena zestawu **EdW09** – 47 zł brutto
(www.sklep.avt.pl)

Uwaga Szkoły

Tylko dla szkół prenumerujących „Młodego Technika” przygotowano **Pakiety Szkolne** zawierające 10 zestawów EdW09 (**PS EdW09**) w promocyjnej cenie 280 zł brutto, tj. z rabatem 40%.

Autorem zaplanowanego na ponad rok **Praktycznego Kursu Elektroniki** jest **Piotr Górecki**, redaktor naczelny kultowego w świecie hobbystów elektroników miesięcznika Elektronika dla Wszystkich i autor legendarnych cykli artykułów i książek uczących elektroniki od podstaw.



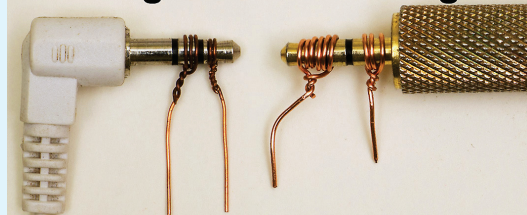
Projekt 11

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.

połączenie szeregowe

połączenie równoległe

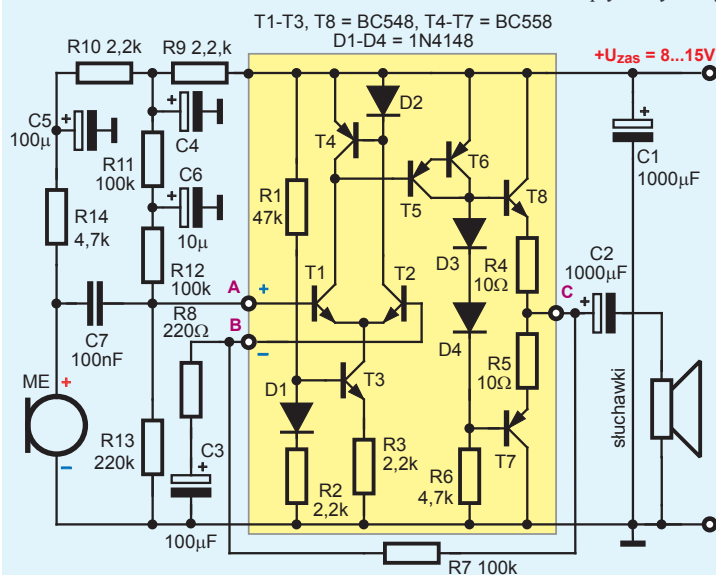


Najlepszy efekt uzyskasz na otwartej przestrzeni, na łonie natury, poza domem. Zdziwisz się, jak brzmi w słuchawkach wzmocniony śpiew ptaków, szczekanie psów i rozmaite odgłosy życia codziennego. Czułość wzmacniacza możesz regulować według upodobań i potrzeb, zmieniając wartość jednego tylko rezystora.

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 pominąć wyprowadzenie masy i wykorzystać połączenie szeregowe. 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 byłoby go dołączyć do wejścia AUX domowego zestawu audio. Nie proponuję takiego rozwiązania,



A

B



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 dwuzwojowego 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 wzmacniacz 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, należy 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 $22\Omega \dots 2,2k\Omega$. U mnie, z dobrymi słuchawkami, optymalna wartość R8 wyniosła 220Ω – przy mniejszych układ miał wprawdzie większą czułość, ale się wzbudzał. Ale wypróbowałem też pracę z rezystorem $R8 = 22\Omega$ – dało to ogromną czułość, ale układ trzeba było wystawić na parapet, zamknąć okno i dopiero wtedy przestał się wzbudzać. Uzyskiwany efekt był wtedy znakomity.

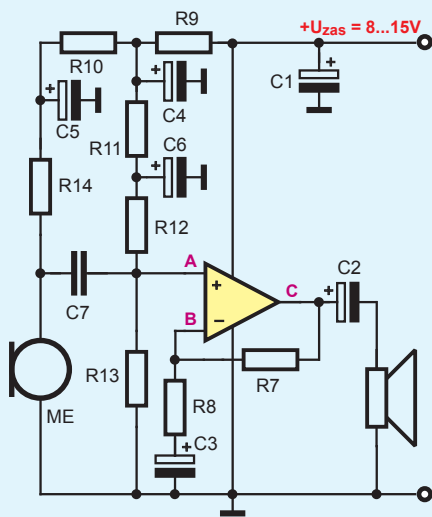
Jeśli potraktujemy nasz „goły wzmacniacz” wyróżniony kolorową podkładką jako „żółtą skrzynkę”, to schemat naszego podsłuchu będzie wyglądał jak na **rysunku C**.

Wykonaj taki układ i przetestuj. A pod koniec tego wykładu przedstawię propozycję budowy pokrewnej wersji *Whispera*.

Wykład z ćwiczeniami 11

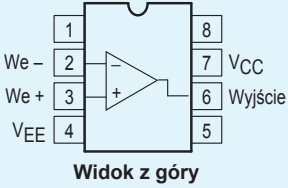
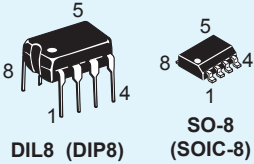
Poznajemy elementy i układy elektroniczne

Uniwersalny wzmacniacz. We 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 małych sygnałów *zmiennych*. Poradziliśmy 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 bardzo często wykorzystujemy – używamy szczególnego rodzaju wzmacniaczy o bardzo dużym wzmocnieniu. I właśnie budując układ z fotografii tytułowej i rysunku C „wynaleźliśmy”...

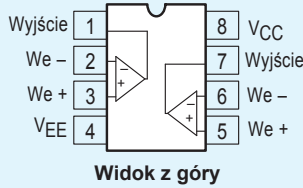
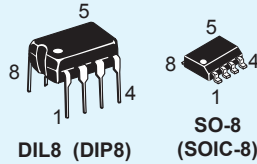




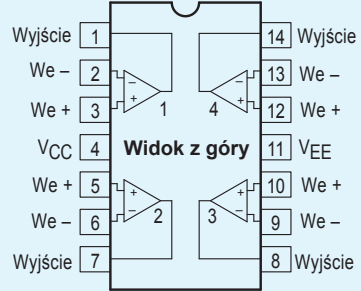
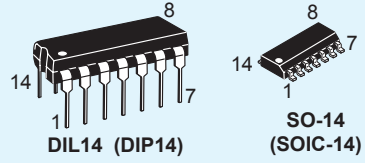
Pojedynczy (Single)



Podwójny (Dual)



Poczwórny (Quad)

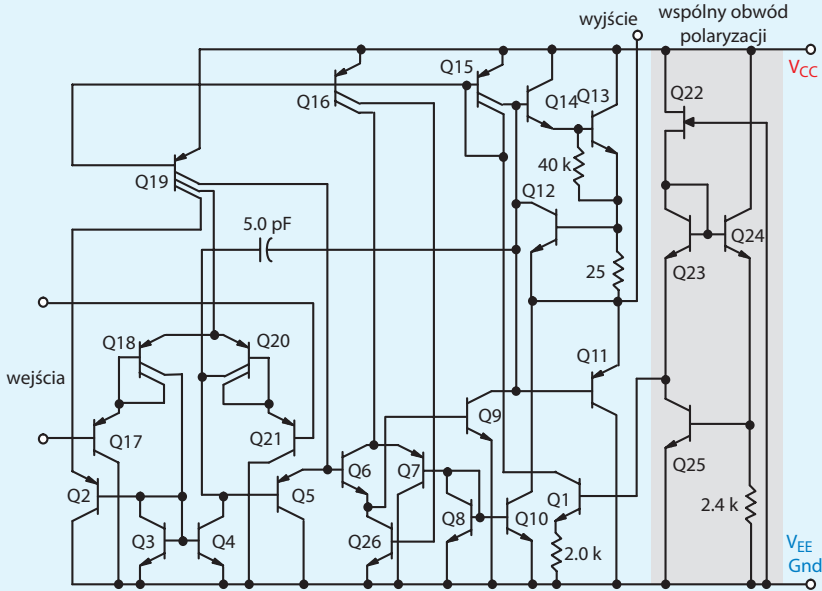
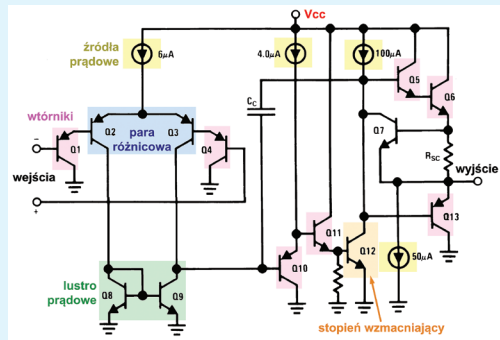


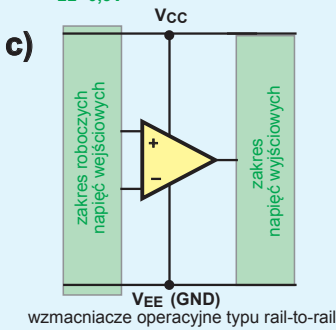
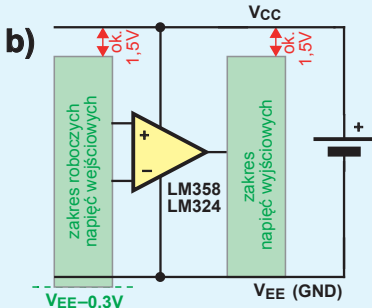
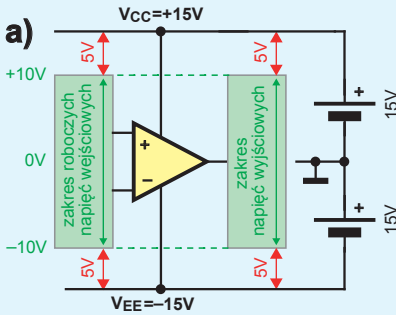
wykorzystujemy też wzmacniacze podwójne i poczwórne. Zapamiętaj rozmieszczenie podstawowych wyprowadzeń w scalonych wzmacniaczach operacyjnych pojedynczych, podwójnych i poczwórnych w standardowych obudowach DIL – patrz **rysunek 5**. Zauważ, że mamy tylko dwie nóżki zasilania: dodatnią (V_{CC}) i ujemną (V_{EE}). Brak natomiast wyprowadzenia masy. We wzmacniaczach pojedynczych „nadmiarowe” nóżki często pozwalają skorygować tzw. napięcie niezrównoważenia, a czasem pozwalają na tzw. kompensację częstotliwościową.

Nasz układ scalony LM358 z zestawu EdW09 to podwójny wzmacniacz operacyjny, czyli z wyprowadzeniami według rysunku 5b. Jest to wersja opracowanej w 1972 roku kostki LM324, zawierającej cztery wzmacniacze. Schemat wewnętrzny pojedynczego wzmacniacza pokazany jest 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 jednakową temperaturę. W rzeczywistości układ scalony ma nieco inną budowę, niż układ z elementów pojedynczych – dyskretnych. Dokładniejszy schemat wzmacniacza LM358 pokazany jest na **rysunku 7**. W szczególności nie będziemy się jednak zagłębiać.

Początkowo wzmacniacze





wzmacniacze operacyjne typu rail-to-rail

operacyjne zasilane były napięciem symetrycznym $\pm 15\text{ V}$, a przetwarzane sygnały użyteczne miały zakres $\pm 10\text{ V}$ względem masy. Wystarczyło, żeby wejścia i wyjścia wzmacniaczy operacyjnych prawidłowo pracowały w zakresie napięć wejściowych i wyjściowych $\pm 10\text{ V}$, co zilustrowane jest zielonymi podkładkami na **rysunku 8a**. Pozostawał bezpieczny margines 5 V 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 $\pm 1,5\text{ V} \dots \pm 16\text{ V}$ albo pojedynczym $3\text{ V} \dots 32\text{ V}$. Obecnie, w związku z tendencją do obniżania napięć zasilających, coraz popularniejsze są tak zwane wzmacniacze *rail-to-rail*, które dzięki specyficznej budowie wejść i wyjść mogą pracować w niemal pełnym zakresie napięć wyjściowych, a zakres wspólnych napięć wejściowych w większości nawet wykracza poza szyny zasilania – **rysunek 8c**.

Idealem byłby „superidealny” wzmacniacz operacyjny, o zerowych prądach wejściowych i doskonałej symetrii wejść, całkowicie niewrażliwy na zmiany temperatury, nieskończenie szybki i o nieograniczonej dużej prądzie wyjściowym, którego wejścia i wyjścia mogłyby pracować w całym zakresie napięć zasilania. Takiego wzmacniacza nie ma i nie będzie, niemniej także niedoskonałe wzmacniacze operacyjne są genialnie uniwersalnymi „cegielkami” w układach analogowych. Obecnie dostępne są setki typów wzmacniaczy operacyjnych o bardzo różnej budowie wewnętrznej i różnych parametrach. W niektórych

zastosowaniach potrzebne są wzmacniacze operacyjne zasilane niskimi napięciami, nawet $1 \dots 1,5\text{ V}$ 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*).

Podstawowe parametry wzmacniaczy operacyjnych to: dopuszczalny zakres napięć zasilania, zakres

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

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltages			Vdc
Single Supply	V_{CC}	32	
Split Supplies	V_{CC}, V_{EE}	± 16	
Input Differential Voltage Range	V_{IDR}	± 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	$^\circ\text{C}$
Thermal Resistance, Junction-to-Air	$R_{\theta JA}$	238	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to $+125$	$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	LM258 LM358	-25 to $+85$ 0 to $+70$	$^\circ\text{C}$

roboczych napięć wejściowych i wyjściowych, szybkość (SR – Slew Rate w $\text{V}/\mu\text{s}$) 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



mikroampera). 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 nierównoważenia** (*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**

nierównoważenia, inaczej napięcie offsetu – przesunięcia (*offset voltage*). Jak już wiemy, przy wzmacnieniu rzędu setek tysięcy, a nawet miliona, do zmiany napięcia na wyjściu o 1 V 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 nierównoważenia – 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 nierównoważenia** (*offset voltage*), podaje się też **dryft ciepły napięcia nierównoważenia** (*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 nierównoważenia 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 pokazuje podstawowe parametry robocze (z katalogu ST). Zwróć uwagę, że podane są zarówno spodziewane wartości typowe (Typ.) oraz gwarantowane dla wszystkich egzemplarzy (Max, Min).

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

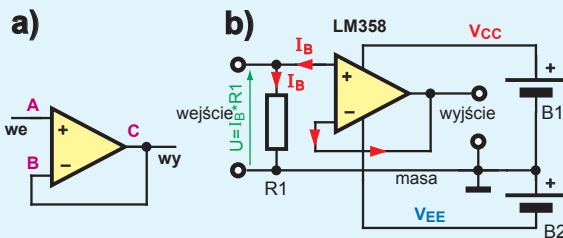
Wtórnik. Wystarczy połączyć wyjście z wejściem odwracającym („ujemnym”) według **rysunku 11a**, by otrzymać wtórnik – bufor o wzmacnieniu równym jedności. Wiemy, że w związku z ogromnym

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

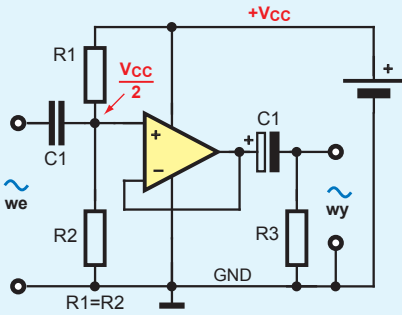
 $V_{CC} = +5V, V_o = 1.4V, T_{amb} = +25^{\circ}C$ (unless otherwise specified)

napięcie nierównoważenia
dryft napięcia nierównoważenia
prąd polaryzacji wejść
wejściowy prąd nierównoważenia
dryft prądu nierównoważenia
wzmocnienie (maksymalne)
pobór prądu
roboczy zakres napięć wejściowych
wydajność prądowa wyjścia
zakres napięć wyjściowych
szybkość wyjścia
iloczyn wzmacnienia i pasma zniekształcenia
szumy

Parameter	LM158-LM258 LM358		Unit
	Min.	Typ. Max.	
V_{io} Input Offset Voltage $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	2	7 9	mV
DV_{io} Input Offset Voltage Drift		7 30	$\mu V/^{\circ}C$
I_{ib} Input Bias Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	20	150 200	nA
I_{io} Input Offset Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	2	30 40	nA
DI_{io} Input Offset Current Drift		10 300	$pA/^{\circ}C$
A_{vd} Large Signal Voltage Gain $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50 25	100	V/mV
I_{CC} Supply Current, all Amp, no load $V_{CC} = +5V$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $V_{CC} = +30V$	0.7	1.2 2	mA
V_{icm} Input Common Mode Voltage Range $V_{CC} = +30V$ $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	0		$V_{CC} + 1.5$ $V_{CC} - 2$
I_{source} Output Current Source $V_{CC} = +15V$	20	40 60	mA
I_{sink} Output Sink Current $V_{CC} = +15V, V_o = +2V$ $(V_{id} = -1V)$ $V_{CC} = +15V, V_o = +0.2V$	10 20	20 50	mA μA
V_{OPP} Output Voltage Swing $(R_L = 2k\Omega)$ $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	0	0	$V_{CC} + 1.5$ $V_{CC} - 2$
SR Slew Rate $R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$, unity Gain	0.3	0.6	V/ μs
GBP Gain Bandwidth Product	0.7	1.1	MHz
THD Total Harmonic Distortion		0.02	%
e_n Equivalent Input Noise Voltage $f = 1kHz, R_S = 100\Omega, V_{CC} = 30V$		55	nV \sqrt{Hz}



12

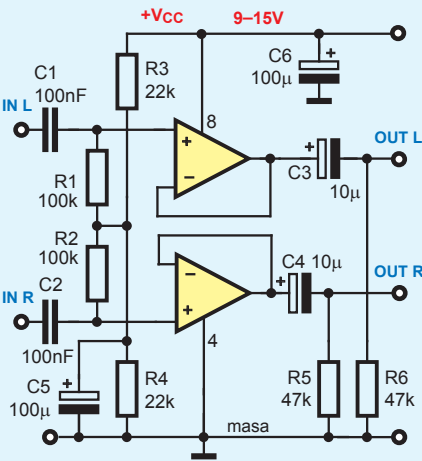


wzmocnieniem napięciowym wzmacniacza operacyjnego, do uzyskania na wyjściu zmian rzędu kilku woltów, wystarczą zmiany napięcia różnicowego między wejściami rzędu mikrowoltów, praktycznie niemierzalne. Podanie z zewnątrz napięcia na wejście nieodwracające (A) spowoduje taką reakcję wyjścia, żeby napięcie 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 2 mV, maksymalnie do 9 mV).

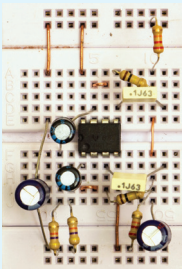
Choć przy analizie działania często zakładamy, że prądy wejściowe są równe zero, jednak należy pamiętać, że zawsze trzeba zapewnić przepływ niewielkich stałych prądów polaryzacji wejść. Ponieważ w LM358 stały prąd polaryzacji wejść (typowo $I_B = 20 \text{ nA}$, maksymalnie $0,2 \mu\text{A}$) wypływa z wejść, więc w układzie z **rysunku 11b** na rezystorze R1 wejściowym występuje spoczynkowe napięcie stałe ($U = I_B \cdot R1$). Taki wtórnik pracuje prawidłowo zarówno przy sygnałach stałych, jak i zmiennych, w zakresie napięć wyjściowych zaznaczonym kolorem zielonym na rysunku 8b. Takie wtorniki mają parametry zdecydowanie lepsze od prostego wtornika z jednym tranzystorem (pomijając kwestię szybkości): mają bardzo dużą rezystancję wejściową, praktycznie równą rezystancji R1 i znikomą 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

13



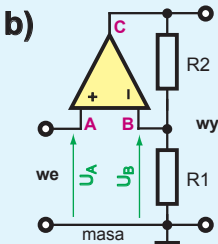
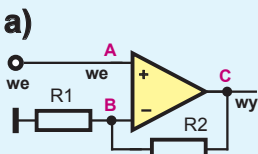
rysunku 12. Obwód wyjściowy C2R3 odcina składową stałą, czyli zapewnia na wyjściu napięcie stałe równe zero – potencjał masy.

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



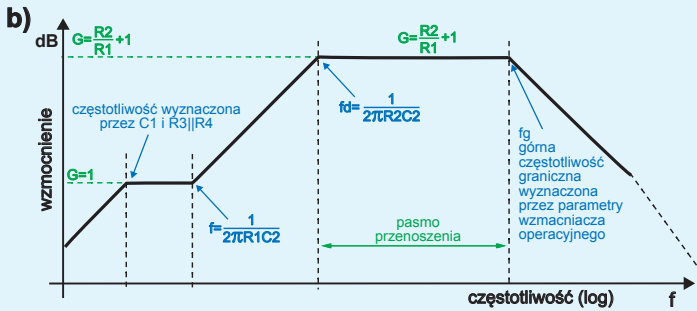
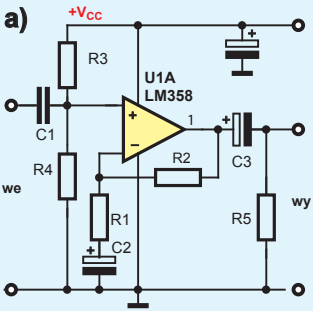
14

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. Znow pamiętamy, że do dużych zmian napięcia wyjściowego, wystarczy znikomą małą zmianą 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 wyznacza wzmacnienie: $U_C / U_A = G = R2 / R1 + 1$. Jeśli przy zasilaniu 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 wzmacnieniu 1, czyli 0 dB, natomiast dla przebiegów zmiennych, gdy C2 ma małą reaktancję (praktycznie stanowi zwarcie), wzmacnienie wyznaczają rezystory ujemnego sprzężenia zwrotnego i wynosi ono $G = 1 + R2 / R1$. **Rysunek 16b** pokazuje charakterystykę częstotliwościową i częstotliwościowe charakterystyczne.



15

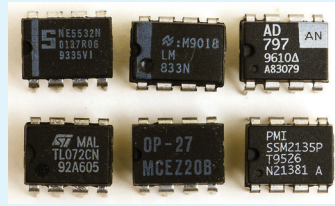
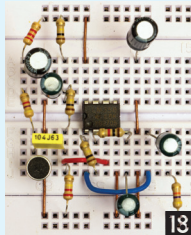
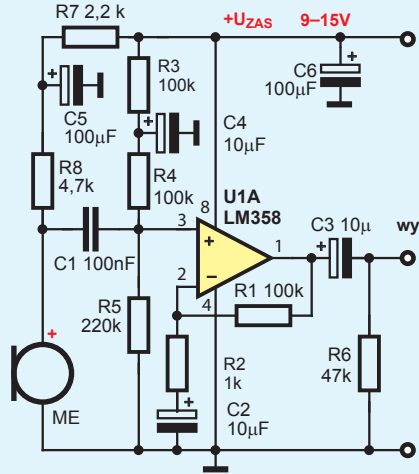
Możesz zbudować wzmacniacz mikrofonowy według **rysunku 17** (porównaj z rysunkiem C na wstępie tego wykładu). Wykorzystujesz jeden z dwóch wzmacniaczy kostki LM358, drugi może zostać niepodłączony. Mój model pokazany jest na **fotografii 18**. Jednak nasz wzmacniacz LM358



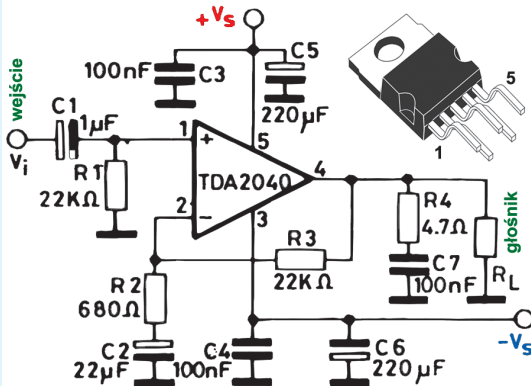
jest powolny i nie jest optymalizowany do zastosowań audio. W przedwzmacniaczu mikrofonowym należałoby raczej wykorzystać inną, lepszą kostkę, choćby podwójny wzmacniacz operacyjny NE5532 lub TL072 lub inny wzmacniacz wysokiej jakości – przykłady na fotografii 19.

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.

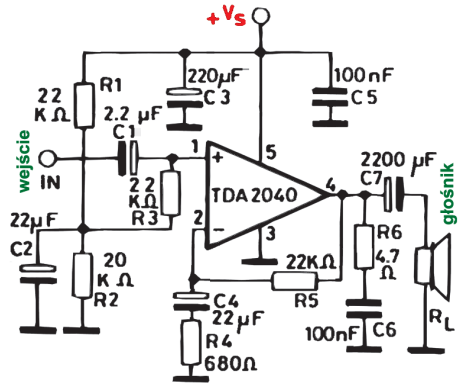
Wzmacniacz odwracający. Na pozór dziwna konfiguracja z **rysunku 21a** okazuje się genialnie uniwersalna. Wejście nieodwracające („dodatnie”) jest tu na stałe dołączone do masy. Znowu pamiętamy, że do zmiany napięcia na wyjściu, wystarczą znikome zmiany na wejściu odwracającym („ujemnym”), rzędu mikrowoltów. Przykładowo jeżeli podamy na wejście X napięcie dodatnie U_1 , to popłynie prąd I_1 . Pomijamy teraz maleńki prąd wejściowy wzmacniacza – cały prąd I_1 płynie przez R2 i dalej wpływa do wyjścia wzmacniacza i dalej do ujemnej szyny zasilania. Ilustruje to **rysunek 21b**. W związku z tym rezystancja wejściowa jest równa R1. Napięcie wyjściowe U_2 przyjmij taką wartość, żeby zachować w punkcie B napięcie równe zero – to nie żadna magia czy zdolność przewidywania, tylko efekt ujemnego sprzężenia zwrotnego



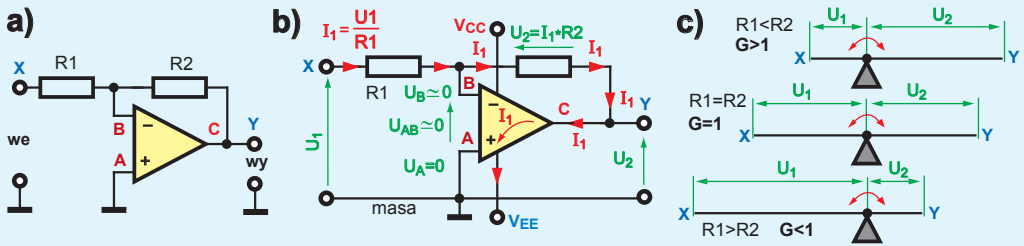
zasilanie napięciem symetrycznym



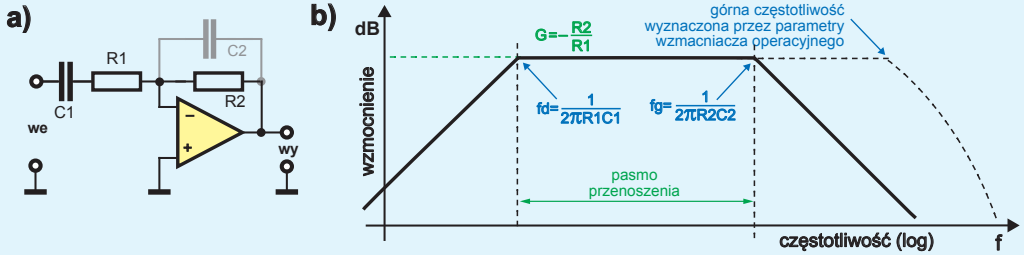
zasilanie napięciem pojedynczym



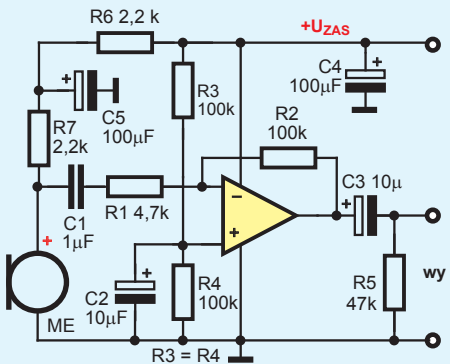
21



22



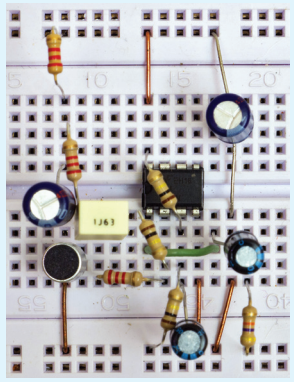
23



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 że punkt B to masa wirtualna.

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

24

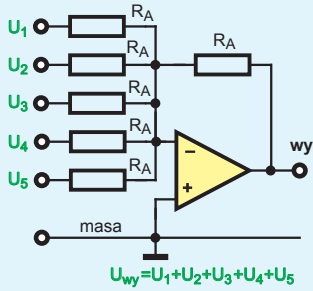


na wyjściu Y. Wzmacniacz odwracający możemy wyobrazić sobie jako dziecięcą huśtawkę – dźwignię, ze środkiem obrotu w punkcie B, o długościach ramion wyznaczonych przez rezystancje R1, R2 – **rysunek 21c**. We wzmacniaczu nieodwracającym minimalne wzmacnienie wynosi 1, a tu, we wzmacniaczu odwracającym może wynosić zero – wystarczy zmniejszyć rezystancję R2 do zera.

W praktyce dość często wykorzystujemy wersję „zmiennoprądową” według **rysunku 22a**. Przy małych częstotliwościach reakcja kondensatora C1 jest duża i wzmacnienie całości – małe. Jak pokazuje charakterystyka z **rysunku 22b**, w paśmie przenoszenia, czyli powyżej częstotliwości $f_d = 1/2\pi R1C1$, wzmacnienie wynosi $G = -R2/R1$. Górną częstotliwość graniczną (f_g) wyznaczają właściwości (szybkość) wzmacniacza operacyjnego, ale w razie potrzeby można ją obniżyć, dołączając pojemność C2. Wartość R2 zwykle wynosi 10 kΩ...220 kΩ.

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 R2 w zakresie 22 kΩ...220 kΩ. W każdym razie wartość rezystora R1 nie powinna być mniejsza od 2,2 kΩ. I właśnie z uwagi na ograniczenia związane z rezystancją R1, we wzmacniaczach mikrofonowych zdecydowanie częściej wykorzystujemy konfigurację nieodwracającą według rysunków 15-17.

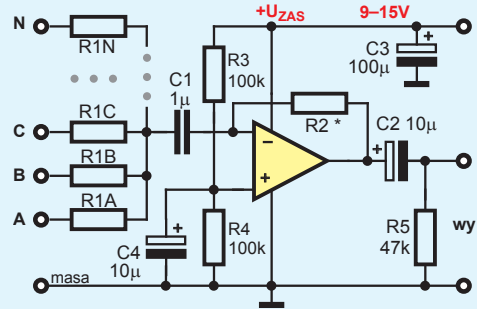
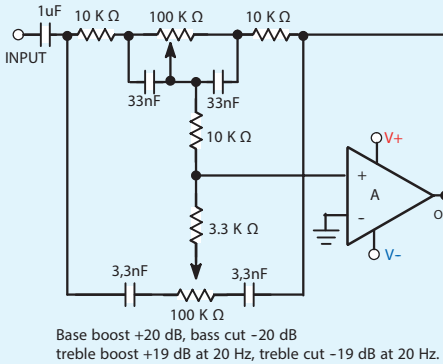
25



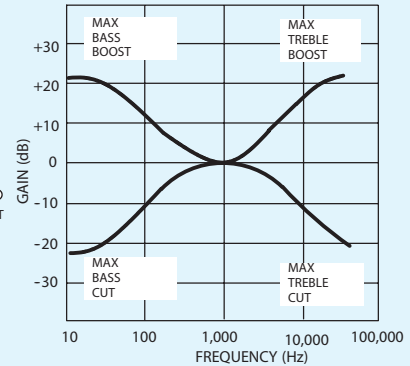


Natomiast wzmacniacz w konfiguracji odwracającej możesz wykorzystać do wielu innych pożytecznych celów, w tym w torach sygnałów audio. A na marginesie: nie obawiaj się, że wzmacniacz ma wzmocnienie ujemne, czyli że odwraca fazę przebiegu zmiennego – w układach audio nie ma to żadnego znaczenia, byle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

Wzmacniacz odwracający jest też znakomitym sumatorem. Możesz wykonać i praktycznie wykorzystać sumator, czyli mikser audio ze wzmacniaczem. Idea



26



27

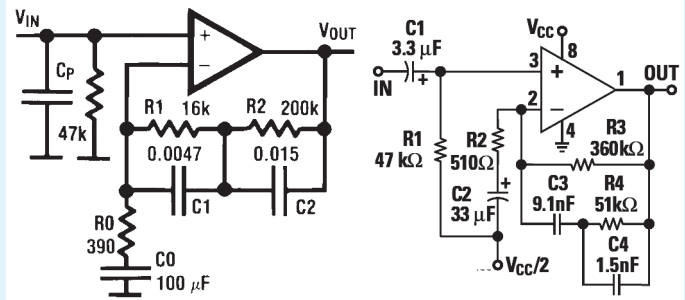
pokazana jest na **rysunku 25**. Praktyczny mikser, zasilany napięciem pojedynczym możesz zbudować według **rysunku 26**. W miejsce rezystora R2 można wstawić potencjometr, co pozwoli regulować wzmocnienie sumy sygnałów od zera. Dla prawidłowej regulacji głośności, powinien to być potencjometr o tzw. 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.

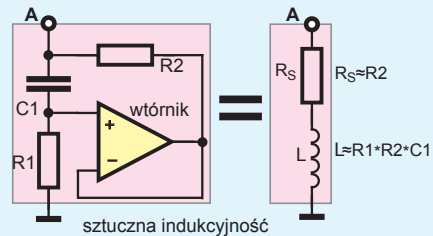
A jeśli mowa o korektorach, to do odtwarzania czarnych płyt winylowych potrzebny jest wzmacniacz korekcyjny o tak zwanej charakterystyce RIAA. **Rysunek 28** pokazuje dwa przykłady realizacji takiego przedwzmacniacza (z katalogu Texas Instruments). Poznane w poprzednim odcinku układy sztucznej indukcyjności najczęściej są realizowane z wtórnikiem scalonym według **rysunku 29** i stworzone z nich obwody rezonansowe pracują w wielopasmowych korektorach graficznych – equalizerach.

Omówione w tym wykładzie propozycje układowe można z powodzeniem wykorzystać w urządzeniach audio. Przykładowy schemat blokowy jednego kanału bardziej rozbudowanego wzmacniacza – miksera pokazuje **rysunek 30**.

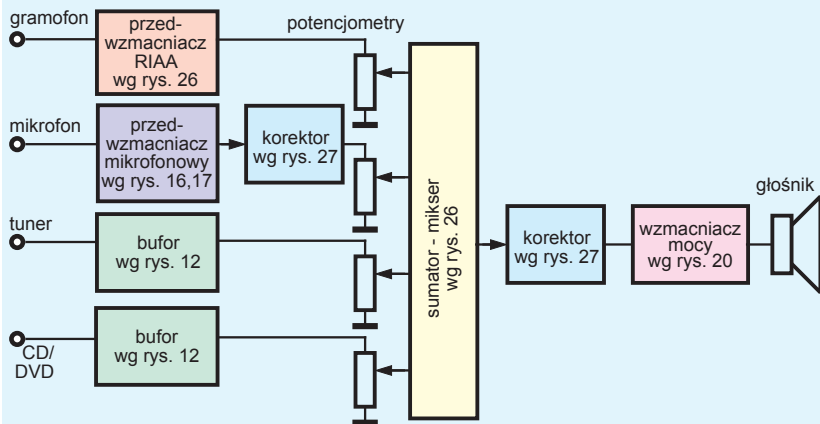
A teraz wróćmy do „superpodsluchu” z projektu tytułowego. Można go z jeszcze lepszym skutkiem zrealizować ze scalonymi wzmacniaczami operacyjnymi z kostki LM358. Jeszcze bardziej czuły układ podsluchowy mógłby wyglądać jak na **rysunku 31** i **fotografii 32**. W roli filtra wrażliwych obwodów polaryzacji tym razem pracuje tranzystor T3. Kondensator C4 nie pozwala na gwałtowne zmiany napięcia na bazie, a tym samym na jego emiterze, więc napięcie do zasilania mikrofonu oraz obwodu sztucznej masy (R2, R3,



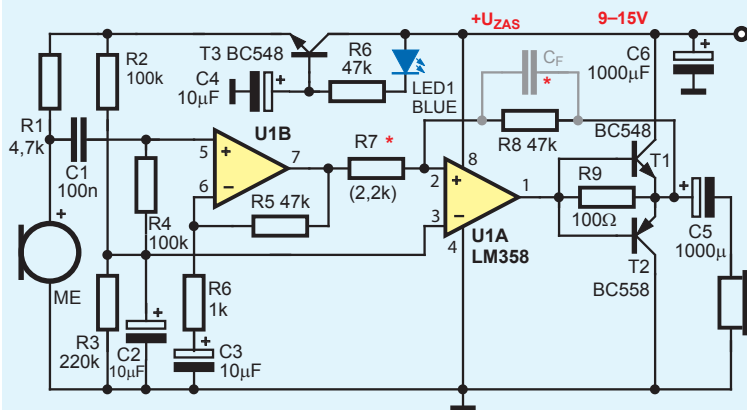
28



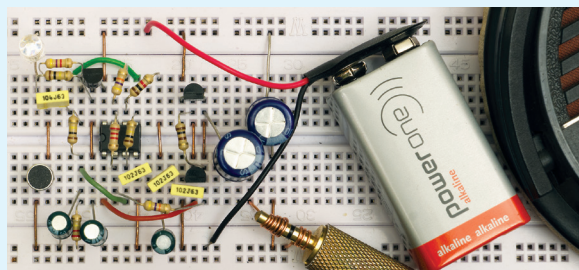
29



C2) jest dobrze odfiltrowane.
W torze sygnały mamy połączone kaskadowo dwa wzmacniacze z kostki LM358. Wzmacniacz U1B pracuje w konfiguracji nieodwracającej. Jego wzmacnienie ustalone jest przez stosunek rezystancji R5/



(33,6 dB) 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=kΩ, a potem spróbuj wstawiać mniejsze wartości (4,7 kΩ, 2,2 kΩ, 1 kΩ...), aż układ się wzbudzi i nie pomoże odsuniecie mikrofonu od słuchawek. U mnie R7 = 2,2 kΩ.

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 1 nF mają w sumie 1/3 pojemności każdego, czyli C_F = 0,33 nF i częstotliwość graniczna filtra dolnoprzepustowego wynosi około 10 kHz (patrz rysunek 22b). Jego wpływ jest ledwo zauważalny. Jeżeli w roli C_F połączysz w szereg dwa kondensatory 1 nF to uzyskasz połowę pojemności (C_F = 0,5 nF), a częstotliwość graniczna wyniesie około 6,8 kHz. Gdy w roli C_F równoległe do R8 włączysz jeden kondensator 1 nF, otrzymasz filtr o częstotliwości około 3,4 kHz. Wtedy nieprzyjemny szum wyraźnie się zmniejszy, ale stracisz też część sygnałów użytecznych. Możesz w roli C_F włączyć dwa połączone równoległe kondensatory 1 nF (C_F = 2 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 μF 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 „superpodszuch” według rysunku 31, nie demontuj go po wypróbowaniu! W projekcie tytułowym następnego wykładu wykorzystamy ten czuły wzmacniacz w zaskakujący sposób. ■

Piotr Górecki