



Elektronika dla początkujących, czyli wyprawy na ośłą łączkę

W EdW, począwszy od numeru 10/2000 do 9/2002, pojawił się cykl artykułów pt. *Elektronika dla początkujących, czyli wyprawy na ośłą łączkę*. Obecnie kurs ten dostępny jest w postaci dwóch tomów książki *Wyprawy w świat elektroniki*, wydanych przez WKiŁ (www.wkl.com.pl), dostępnych także w sklepie AVT (www.sklep.avt.pl). Jak wiadomo, ośła łączka to miejsce, gdzie początkujący narciarze i snowboardziści uczą się podstaw jazdy. Podobnie na elektronicznej oślej łączce w EdW wszyscy chętni mogą nie tylko zdobyć wszystkie najbardziej podstawowe informacje, ale też przeprowadzić szereg niezbędnych ćwiczeń praktycznych, wprowadzających w piękny świat elektroniki.

W tym numerze EdW zaczynamy nowy cykl wypraw na elektroniczną ośłą łączkę. Jest on kontynuacją wcześniejszych wypraw z tym, że teraz zajmiemy się przede wszystkim praktycznym wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych. Cykl będzie miał dwa wątki. Pierwszy to praktyczne ćwiczenia, drugi to niezbędne informacje techniczne, w tym wyjaśnienie działania układów i obserwowanych zjawisk, także tych dziwnych i nieoczekiwanych. Nie będę jednak tłumaczył wszystkiego od zera. Zakładam, że opanowałeś już elementarne podstawy elektroniki, zawarte we wcześniejszych wyprawach cyklu Oślej łączki. Jeżeli nie, to nie straconego – sięgnij po wspomniane dwa tomy *Wyprawy w świat elektroniki*.

Główną osią cyklu są najrozmaitsze ćwiczenia praktyczne. Do wszystkich ćwiczeń potrzebne będą:

- zasilacz stabilizowany 12V 250mA (min. 100mA), np. wtyczkowy,
- jakikolwiek multimetr cyfrowy,
- uniwersalna płytka stykowa.

Ponadto do poszczególnych ćwiczeń konieczne będą elementy elektroniczne, o które możesz z powodzeniem postarać się we własnym zakresie albo kupić je w AVT jako gotowe zestawy do kolejnych ćwiczeń kursu. W ofercie AVT dostępny jest zestaw startowy do niniejszego kursu (EdW A07), zawierający komplet elementów do ćwiczeń 1...4. Więcej szczegółów w reklamie na końcu tego artykułu i na str. 76.

Ćwiczenie 1. „Goły” wzmacniacz operacyjny

Uwaga!

Pierwsze ćwiczenie obejmuje fundamentalne zagadnienia. Nie zlekceważ proponowanych eksperymentów! Nie poprzestań na przeczytaniu opisu! Bardzo ważne, żebyś nie tylko zrozumiał, ale też „poczuł” zachowanie i właściwości wzmacniaczy operacyjnych. Wszystkiego opisać się nie da. Trzeba tego osobiście dotknąć. Nie szczędź więc czasu na eksperymenty!

Na początek zestaw układ według **rysunku 1** i **fotografii 2**. Kondensator filtrujący zasilanie oraz mały ceramiczny 100nF to elementy standardowe. Układ zapewne pracowałby także bez tych elementów, ale od początku nabywaj zdrowych przyzwyczajzeń, które w przyszłości, przy bardziej wyrafinowanych układach, zapobiegą wielu kłopotom i stresom. Nóżki 5, 6 i 7 układu scalonego możesz pozostawić niepodłączone. Dzielnik rezystorowy R1, R2 zapewnia, że na wejściu odwracającym („ujemnym”) napięcie jest równe połowie

napięcia zasilania. Potencjometr PR1 pozwala zmieniać napięcie na wejściu nieodwracającym w pełnym zakresie napięcia zasilania. Do wyjścia wzmacniacza operacyjnego dołączone są dwie diody LED, które będą informować o napięciu stałym na wyjściu, natomiast głośnik poinformuje nas o ewentualnych przebiegach zmiennych. Głośnik powinien mieć jak największą oporność, najlepiej 50Ω...100Ω lub więcej. Taki włas-

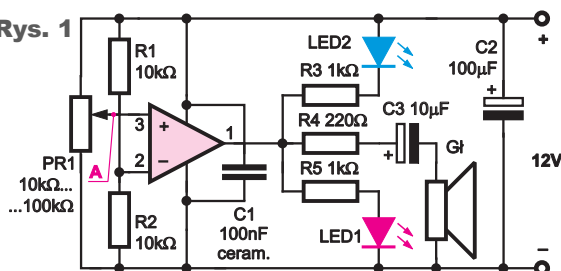
nie głośnik wchodzi w skład zestawu EdW A07, który dostępny jest w sklepie AVT.

Uwaga! Nie pomył się – w tym ćwiczeniu **musisz wykorzystać układ LM358**, a w żadnym wypadku TL082 czy TL072.

Pokręcaj potencjometrem PR1 i zwróć uwagę na zachowanie diod LED oraz głośnika. Pojedynczy stuk w głośniku towarzyszy gwałtownej zmianie napięcia na wyjściu.

W ćwiczeniu tym wzmacniacz operacyjny pełni rolę komparatora, czyli układu porównującego napięcia na swych wejściach. Jest to bodaj najprostsze wykorzystanie wzmacniacza operacyjnego.

Rys. 1



W innych zastosowaniach napięcie na wyjściu wzmacniacza operacyjnego zmienia się płynnie, a tutaj na wyjściu mamy jeden ze stanów: „wysoki” albo „niski” – mówimy, że wzmacniacz operacyjny jest w jednym ze stanów nasycenia. W modelu pokazanym na fotografii celowo tak rozmieściłem diody LED, by czerwona była na górze, a niebieska na dole. Gdy napięcie wyjściowe przyjmuje maksymalny poziom, świeci czerwona dioda LED1. Gdy na wyjściu panuje najniższe możliwe napięcie, świeci niebieska dioda LED2.

Przekonaj się sam, że **zwiększanie** napięcia w punkcie A, czyli na wejściu **nieodwracającym** („dodatnim”), powoduje **zwiększenie** napięcia na wyjściu i zaświecenie czerwonej diody LED1.

Możesz też wypróbować działanie układu o niejako odwrotnym działaniu, według **rysunku 3**. W tym drugim układzie **zwiększanie** napięcia na wejściu **odwracającym** będzie

powodowało **zmniejszenie** napięcia na wyjściu i zaświecenie niebieskiej diody LED2.

Takie próby mogą wydać się banalne i oczywiste. Za chwilę okaże się jednak, że natknijemy się na poważny problem. Problem związany z ogromną czułością, a dokładniej ogromnym wzmocnieniem.

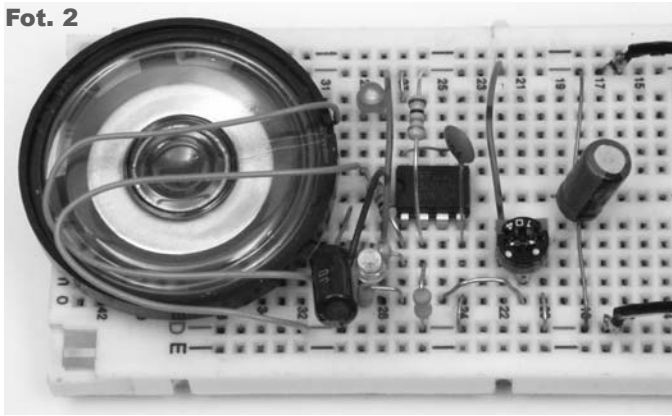
Otóż w układzie według rysunku 1 lub 2 spróbuj tak ustawić potencjometr PR1, żeby napięcie stałe na wyjściu było zbliżone do połowy napięcia zasilania – wtedy powinny świecić obie diody LED, a głośnik powinien milczeć.

Przekonaj się, że wcale nie jest to proste. Mało tego – jest po prostu niemożliwe!

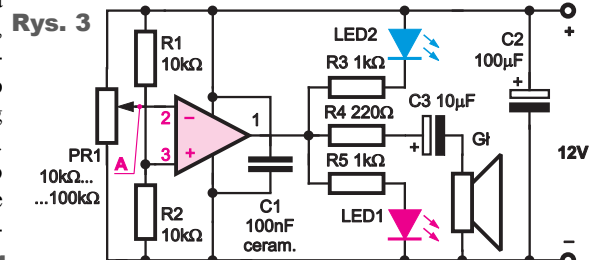
Owszem, prawdopodobnie po kilkunastu próbach zdołasz tak ustawić potencjometr, żeby świeciły obie diody LED. Ale zwróć uwagę, że z głośniczka słychać wtedy terkot, co znaczy, że dzieje się coś złego – na wyjściu wzmacniacza operacyjnego występuje wtedy duży przebieg zmienny. Jest to głównie wzmoc-

niony przydzźwięk sieci 50Hz. Do problemu przydzźwięku za chwilę wrócimy, ale na razie zajmijmy się sprawą wzmocnienia. Zmodyfikuj układ według **rysunku 4**. Zauważ, że wcześniej na punkcie A i wejście nieodwracające podawaliśmy napięcie wprost z suwaka potencjometru. Teraz dodaliśmy dzielnik rezystorowy R6, R7, który zmniejsza zmiany napięcia w punkcie A mniej więcej 1000-krotnie. Ponieważ $R6 = 100k\Omega$, a $R7 = 100\Omega$, więc możemy spokojnie przyjąć, że zmiana napięcia w punkcie B o 12V spowoduje zmiany napięcia w punkcie A tylko o 12mV. Spróbuj ustawić suwak PR1, żeby świeciły obie diody. Teraz nie powinno być z tym trudności. Zbliź głośnik do ucha lub lepiej w miejsce głośnika dołącz jakiegokol-

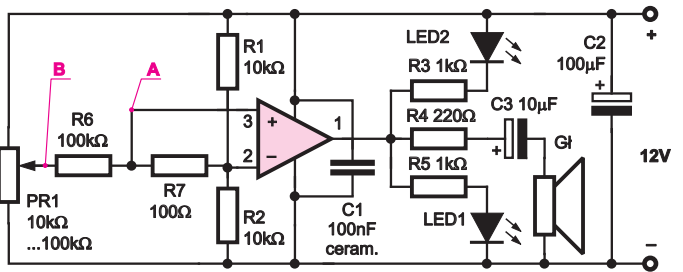
Fot. 2



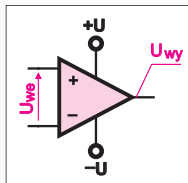
Rys. 3



Rys. 4



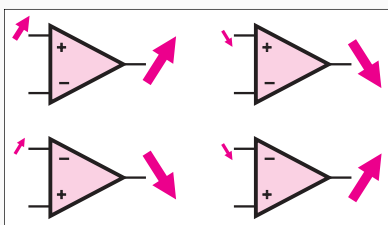
Podstawowa idea jest genialnie prosta: wzmacniacz operacyjny wzmacnia napięcie. Ma jedno wyjście i dwa wejścia, a właściwie jedno tak zwane wejście różnicowe. W praktyce ma też dwie końcówki zasilające. **Wzmacniacz operacyjny reaguje na różnicę napięć między końcówkami wejściowymi**, co pokazują w największym uproszczeniu **rysunek 1A**.



Rys. 1A

Zapamiętaj raz na zawsze fundamentalną zasadę działania wzmacniacza operacyjnego: – **wzrost** napięcia na wejściu **nieodwracającym** „dodatnim” powoduje **wzrost** napięcia wyjściowego

– **wzrost** napięcia na wejściu **odwracającym** „ujemnym” powoduje **zmniejszenie** napięcia wyjściowego, co jest zilustrowane na **rysunku 1B** i co sprawdzaliśmy w ćwiczeniu 1 według rysunków 1 i 3.



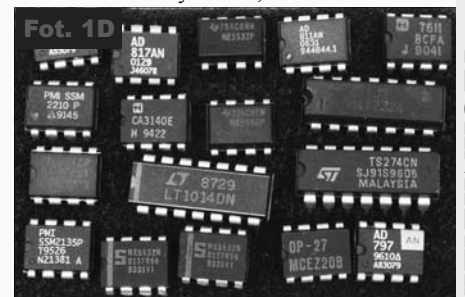
Rys. 1B

Pierwsze wzmacniacze operacyjne umieszczane były w metalowych obudowach, jak pokazuje **fotografia 1C**. Potem upowszechniły się obudowy typu DIL z wyprowadzeniami w rastrze 2,54mm (0,1 cala), plastikowe (**fotografia 1D**) i podobne ceramiczne (**fotografia 1E**). Dziś obudowy tej wielkości też można uznać za przestarzałe. W związku z postępującą miniaturyzacją ciągle pojawiają się coraz mniejsze obudowy. Pochodząca sprzed kilkunastu lat **fotografia 1F** obrazuje wzmacniacz LMV321 firmy

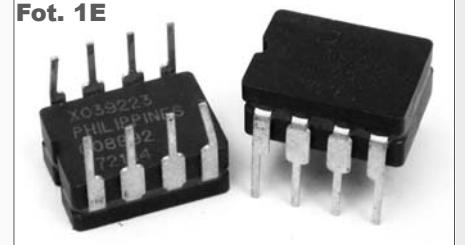
Fot. 1C

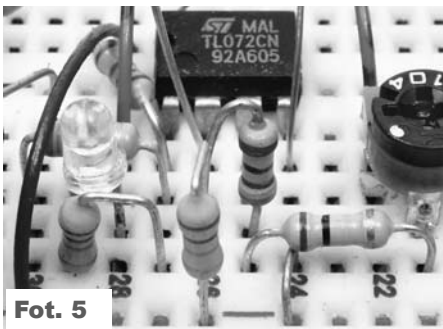


National w obudowie oznaczonej SC-70 o wymiarach 2x2,1x1mm. Aktualnie (rok 2009) dostępne są wzmacniacze w jeszcze mniejszych obudowach - **fotografia 1G** pokazuje układ Maxim MAX9938 (który też jest odmianą wzmacniacza operacyjnego) o rozmiarach obudowy 1x1x0,6mm w zestawieniu



Fot. 1E

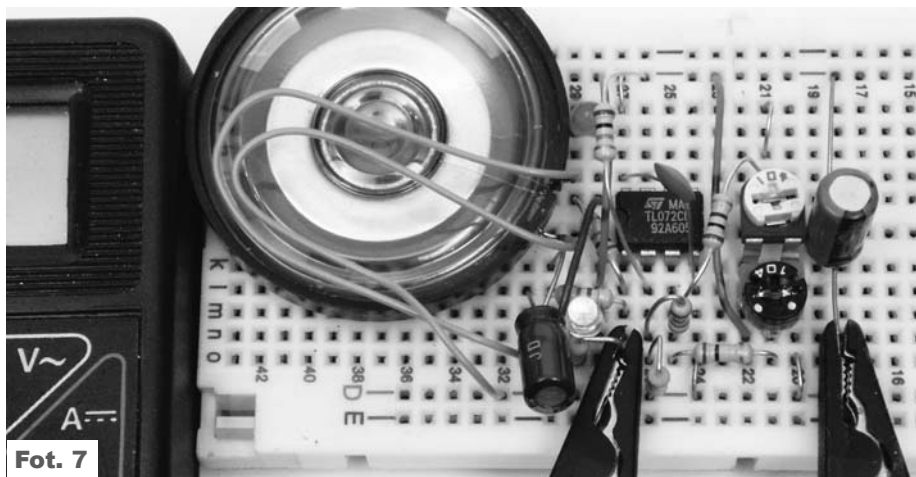




Fot. 5

wiek słuchawki i pokręcając potencjometrem PR1. Najprawdopodobniej przydźwięk sieci zniknie. Zwróć uwagę, że gdy będą świecić obie diody, w głośniku (słuchawce) pojawi się niewielki szum. Gdy świecić będzie tylko jedna z diod, wyjście wzmacniacza będzie w stanie nasycenia i szumu nie będzie. Natomiast gdy świecą obie diody, na jego wyjściu napięcie jest rzędu połowy napięcia zasilania i układ pracuje jako prawdziwy wzmacniacz i to o bardzo dużym wzmocnieniu, stąd te szумы. Zajmijmy się teraz kwestią wzmocnienia.

Po pierwsze, w układzie z rysunku 4 wymień kostkę LM358 na TL082 lub TL072, jak pokazuje **fotografia 5**. Pokręcaj teraz potencjometrem PR1 i zapewne przekonasz się, że układ z rodziny TL0xx ma znacznie większe wzmocnienie niż LM358. Teraz dla zaświecenia obu diod LED musisz starannie i pomału znaleźć właściwe ustawienie suwaka potencjometru.

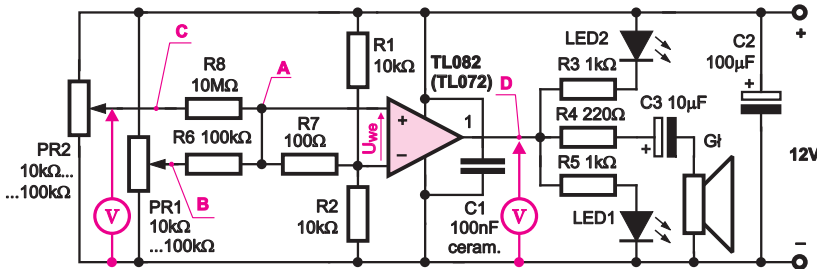


Fot. 7

Dodajmy do naszego układu jeszcze jeden potencjometr PR2 i rezystor R8 o ogromnej wartości 10MΩ, jak pokazuje **rysunek 6**. Rezystor R8 tworzy z rezystorem R7 dodatkowy dzielnik napięcia o tłumieniu aż 100 000 razy. Czyli zmiany napięcia w punkcie C spowodują 100 000 razy mniejsze zmiany napięcia w punkcie A. Napięcie w punkcie A, a ściślej różnicę napięć Uwe możemy więc zgrubnie regulować za pomocą PR1 oraz dokładnie za pomocą PR2.

Przeprowadź teraz bardzo ważny eksperyment: najpierw ustaw potencjometr PR2 w połowie drogi suwaka, dołącz woltmierz napięcia stałego do wyjścia wzmacniacza (do punktu D) i delikatnie ustaw PR1 tak, żeby woltmierz wskazywał około 5,5...6,5V. Teraz ustaw PR2 tak, żeby woltmierz pokazał napięcie wyjściowe równe 5,0V. Podłącz woltmierz do punktu C.

Rys. 6 Zmierz i zapisz wartość występującego tam napięcia. Następnie znów dołącz woltmierz do punktu D i za pomocą PR2 ustaw napięcie wyjściowe równe 7,0V, a następnie zmierz napięcie w punkcie C. Ty na pewno otrzymasz inne wyniki, a



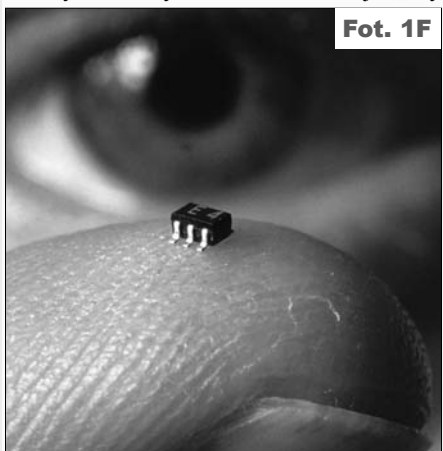
ze zwykłym biurowym spinaczem. W takich najmniejszych obudowach typu BGA (Ball Grid Array) nie ma nóżek, tylko wprost na dolnej stronie płytki krzemowej umieszczone są miniaturowe kuleczki ze stopu lutowniczego (cyny), które w wysokiej temperaturze topią się i tworzą połączenia z płytką drukowaną. Te kuliste wyprowadzenia mają średnicę około 0,3mm, rozmieszczone są w rastrze 0,5mm i umieszczone są pod układem scalonym. Praktycznie niemożliwe jest, by

hobbysta ręcznie zamontował tak małeńki układ na płytce drukowanej. Natomiast nie sprawiają kłopotów montażowych obudowy DIP, a także największe obudowy SMD typu SOIC z wyprowadzeniami w rastrze 1,27mm (0,05 cala), pokazane na **fotografii 1H**.

Oprócz pojedynczych wzmacniaczy operacyjnych bardzo popularne są układy, zawierające dwa lub cztery wzmacniacze operacyjne. Praktycznie wszystkie wzmacniacze operacyjne podwójne i poczwórne mają standardowy rozkład wyprowadzeń, pokazany na **rysunku 1J**. W pojedynczych

podstawowe końcówki zawsze połączone są według **rysunku 1K**, natomiast nóżki 1, 5, 8 mogą być niepodłączone lub pełnić różne role – szczegóły w dalszej części kursu

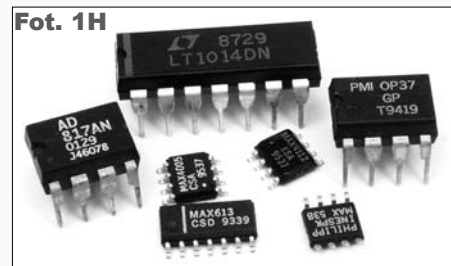
Wzmacniacze operacyjne, nasi główni bohaterowie, wzmacniają zarówno napięcia stałe, jak i przebiegi zmienne. Co ważne, wzmacniacze operacyjne mają bardzo duże, wręcz ogromne wzmocnienie. Zazwyczaj dla napięć stałych to wzmocnienie wynosi co najmniej kilkadziesiąt tysięcy, a w niektórych wzmacniaczach nawet ponad milion. Jeśli wzmocnienie wynosi, powiedzmy, 100 000 razy, oznacza to, że do zmiany napięcia wyjściowego o 1V wystarczy zmiana (różnicowego) napięcia wejściowego tylko o 0,00001V, czyli 0,01 miliwolta, inaczej 10 mikrowoltów.



Fot. 1F



Fot. 1G



Fot. 1H

ja w układzie pokazanym na **fotografii 7** uzyskałem następujące dane:

U_D	ΔU_D	U_C	ΔU_C	ΔU_A
7,0V	2,0V	8,39V	2,11V
5,0V		6,28V		

Zmiana napięcia stałego w punkcie C o 2,11V spowodowała zmianę napięcia wyjściowego o 2V. Tłumik R8, R7 zmniejsza zmiany napięcia w punkcie C aż 100000 razy, więc możemy łatwo obliczyć, że jeśli $\Delta U_C = 2,11V = 2110mV = 2110000\mu V$, to $\Delta U_A = 21,1\mu V$. Teraz łatwo możemy obliczyć wzmocnienie dla napięć stałych:

$$K_u = \Delta U_D / \Delta U_A = 2,0V / 21,1\mu V$$

$$K_u = 94786$$

Zdziwiony? Egzemplarz układu TL072, pokazany na fotografii 7, pracujący w układzie według rysunku 6, ma wzmocnienie stałoprądowe około 95 000 razy! Sprawdź, jakie wzmocnienie stałoprądowe ma Twój egzemplarz kostki TL082 (TL072).

Zachęcam Cię też do dalszych eksperymentów w tym zakresie. Sprawdź, jakie wzmocnienie w takim układzie pracy ma kostka LM358. Prawdopodobnie jej wzmocnienie będzie nieco trochę mniejsze.

Sprawdź też wzmocnienie przy całkowitym braku obciążenia wyjścia. W tym celu odłącz rezystory R3, R4, R5. Wzmocnienie będzie wtedy większe i pomiary z kilku względów mogą być trudniejsze. W razie potrzeby zmień wartość R6 na większą: 470kΩ lub nawet 1MΩ. U mnie układ TL072 bez obciążenia wyjścia miał wzmocnienie ponad 250 000 razy.

Nie poprzestań na przeczytaniu mojego opisu! Koniecznie przeprowadź opisane eksperymenty, także z odłączonymi rezystorami R3 – R5 i dokładnie poznaj zachowanie „gołego” wzmacniacza operacyjnego. To naprawdę bardzo ważne!

Jeśli masz oscyloskop, koniecznie dołącz do wyjścia wzmacniacza i sprawdź, co tam się dzieje przy różnych ustawieniach potencjometrów. Jeżeli nie masz oscyloskopu, dołącz R4 (ale bez R3 i R5) i sprawdź, co słychać w głośniku (słuchawce) przy pokręcaniu potencjometrami, a zwłaszcza gdy potencjometrami ustawisz napięcie wyjściowe w zakresie liniowym. Zapewne będziesz zdziwiony.

Na razie nie przejmuj się problemem przydzwięku sieci i np. wpływem zbliżenia ręki do takiego układu. Tymi szczegółami zajmemy się później. Na razie zwróć uwagę, że nasz „goły” wzmacniacz może być w jednym z trzech stanów. Dwa z nich to stany nasycenia: „dolny” i „górny”, gdy

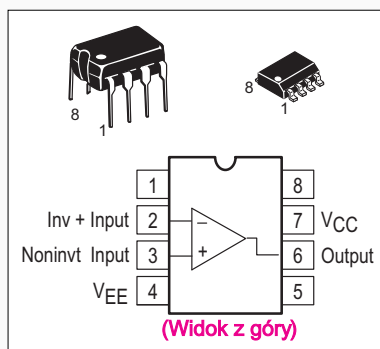
napięcie wyjściowe przyjmuje maksymalną bądź minimalną wartość. Trzeci stan to praca liniowa (praca w zakresie liniowym), gdy wartość napięcia wyjściowego jest pośrednia pomiędzy napięciami nasycenia a wzmacniacz wzmacnia i napięcia stałe i zmienne. Tylko w zakresie liniowym wzmacniacz operacyjny pełni swą właściwą rolę, czyli jest wzmacniaczem, i to o bardzo wielkim wzmocnieniu. Natomiast w stanach nasycenia tylko teoretycznie jest wzmacniaczem. Wprawdzie znaczna różnica napięć wejściowych powoduje trwanie w jednym ze stanów nasycenia, jednak zwróć uwagę, że wtedy drobne zmiany napięć wejściowych nie mają wpływu na nasyczone wyjście, czyli trudno mówić o „prawdziwym” wzmacnianiu. Natomiast w zakresie liniowym nawet znikomo małe zmiany napięcia wejściowego, rzędu mikrowoltów, powodują duże zmiany napięcia wyjściowego. To ogromne wzmocnienie z jednej strony cieszy, ale

Skład zestawu EdW A07:

uniwersalna płytka stykowa	transzystor BC558B – 1szt	rezystor 2,2kΩ 2szt
wzmacniacz TL082 - 2szt	przewody łączeniowe	rezystor 4,7kΩ 2szt
wzmacniacz LM358 - 3szt	100nF ceramiczne 2szt	rezystor 10kΩ 4szt
głośnik 40...100Ω	1nF 2szt	rezystor 22kΩ 2szt
LED niebieska 5mm - 1szt	10nF MKT 2szt	rezystor 47kΩ 2szt
LED czerwona 5mm – 3szt	100nF stały MKT 2szt	rezystor 100kΩ 4szt
LED biała 5mm - 1szt	1uF stały MKT 2szt	rezystor 220kΩ 2szt
fotorezystor (mini) 1szt	10uF/16V 3szt	rezystor 470kΩ 2szt
termistor NTC 10...22kΩ 1szt	100uF/16 3szt	rezystor 1MΩ 2szt
mikrofon elektretowy 1szt	1000uF/16V 1szt	rezystor 10MΩ 2szt
Membrana piezo 1szt	rezystor 100Ω 2szt	potencjometr mini 1kΩ 1szt
dioda 1N4148 - 4szt	rezystor 220Ω 2szt	potencjometr mini 10kΩ 1szt
transzystor BC548B - 3szt	rezystor 470Ω 4szt	potencjometr mini 100kΩ 1szt
	rezystor 1kΩ 4szt	potencjometr mini 1MΩ 1szt

W praktyce oznacza to, że „goły” wzmacniacz silnie wzmacnia także szумы i rozmaite zakłócenia.

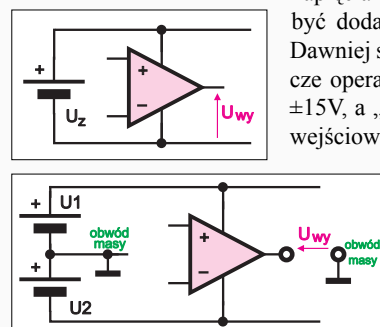
Można powiedzieć, że klasyczny sposób zasilania wzmacniaczy operacyjnych polega na zastosowaniu symetrycznego zasilania z dwoma źródłami napięcia według **rysunku 1L**. Bardzo ważny jest fakt, że występuje tu obwód masy, a



Rys. 1J

Rys. 1K

Rys. 1M

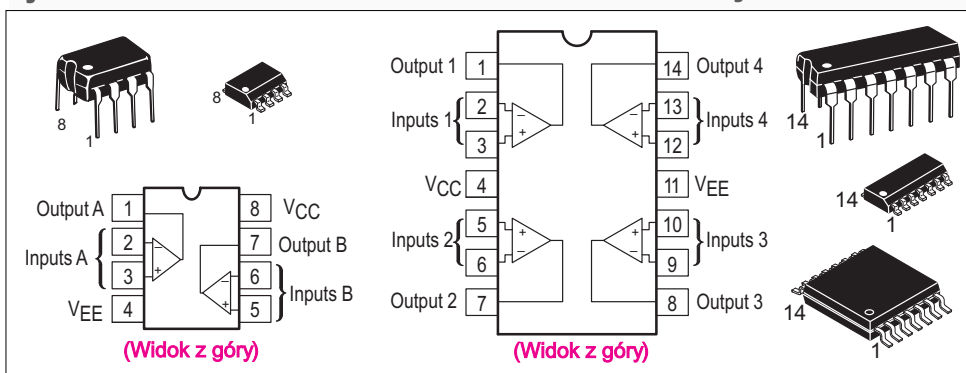


Rys. 1L

napięcia wejściowe i wyjściowe mogą być dodatnie i ujemne względem masy. Dawniej standardowo zasilano wzmacniacze operacyjne napięciem symetrycznym ±15V, a „kanonicznym” zakresem napięć wejściowych i wyjściowych był zakres od -10V do +10V. Dziś wzmacniacze operacyjne zazwyczaj zasilają się znacznie niższym napięciem, na przykład ±5V, a coraz częściej napięciem pojedynczym według **rysunku 1M**, i to coraz niższym:

+12V, +5V, +3V lub nawet jeszcze mniejszym, nawet poniżej 1V.

Należy zauważyć, że przy zasilaniu napięciem pojedynczym znika „środkowa” szyna masy. W niektórych przypadkach w ogóle nie trzeba przejmować się problemem masy, ponieważ wzmacniacz reaguje na różnicę napięć między końcówkami wejściowymi. Tak jest we wszystkich ćwiczeniach pierwszej wyprawy na „operacyjną” ośła łączkę. W niektórych innych zastosowaniach można ujemną szynę zasilania potraktować



właśnie to ćwiczenie ma Cię przekonać, że w „gołym” wzmacniaczu może być i jest źródłem poważnych kłopotów.

Przekonaj się osobiście, że wzmacniacze operacyjne rzeczywiście mają imponujące wzmocnienie, ale są bardzo kapryśne. Z uwagi na ogromną czułość i rozmaite szkodliwe wpływy, bardzo trudno ustawić i utrzymać pracę „gołego” wzmacniacza w zakresie liniowym, czyli utrzymać napięcie wyjściowe o wartości pośredniej między napięciami nasycenia. Napięcie na wyjściu łatwo „ucieka”, czyli zmienia swą wartość pod wpływem rozmaitych czynników i wyjście bardzo chętnie się nasycy. Jeśli z kolei

napięcie wejściowe zmienia się bardzo powoli, na wyjściu mogą się pojawiać i pojawiają się najrozmaitsze wzmocnione „śmieci”. Może po eksperymentach uznasz, że tak duże wzmocnienie jest wadą, a nie zaletą. To byłby niewłaściwy wniosek! Jak się jeszcze przekonasz, to ogromne wzmocnienie, choć czasem wydaje się wadą, w rzeczywistości jest kluczową, bezcenną wręcz zaletą.

Od razu też sygnalizuję, iż w praktyce wzmacniacze operacyjne nie pracują w sposób, jaki badamy w tym pierwszym ćwiczeniu. Bardzo rzadko, a praktycznie nigdy pracują jako „gołe” wzmacniacze. Zazwyczaj wyposażone są w obwody dodatniego albo

częściej ujemnego sprzężenia zwrotnego. W następnym ćwiczeniu zajmiemy się dodatnim sprzężeniem zwrotnym.

A na razie zapamiętaj tylko, że przy wykozystaniu „gołego” wzmacniacza, bez obwodów sprzężenia zwrotnego, ogromne wzmocnienie może być i często bywa przyczyną rozmaitych kłopotów.

Piotr Górecki

W sieci handlowej AVT dostępny jest kit EdW A07 zawierający kompletny zestaw elementów do ćwiczeń 1...4. Szczegóły na str. 76

wać jako najprawdziwszą masę, a w jeszcze innych nie jest to takie proste i trzeba dodać obwód tak zwanej sztucznej masy. Tymi istotnymi sprawami zajmiemy się na następnych ćwiczeniach.

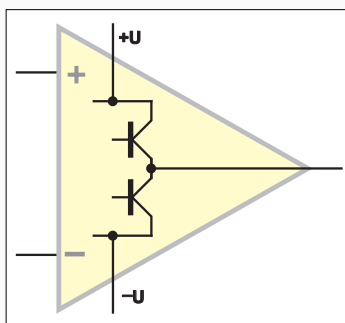
Zakres pracy liniowej. Najogólniej biorąc, na wyjściu wzmacniacza pracują tranzystory, co zilustrowane jest w uproszczeniu na **rysunku 1N**. Rozróżniamy trzy główne tryby pracy wyjścia:

– Gdy górny tranzystor jest w pełni otwarty, a dolny zatkany, mówimy o nasyceniu wyjścia. Napięcie wyjściowe przyjmuje największą możliwą wartość. Napięcie wyjściowe nie może jednak zrównać się z potencjałem dodatniej szyny zasilania – zawsze będzie nieco mniejsze. Decydują o tym napięcia nasycenia i inne czynniki, które szczegółowo

zbadamy w dalszej części kursu.

– Gdy dolny tranzystor jest całkowicie otwarty, a górny zamknięty, także mówimy o nasyceniu wyjścia. Napięcie wyjściowe przyjmuje najniższą możliwą wartość, nieco wyższą

Rys. 1N

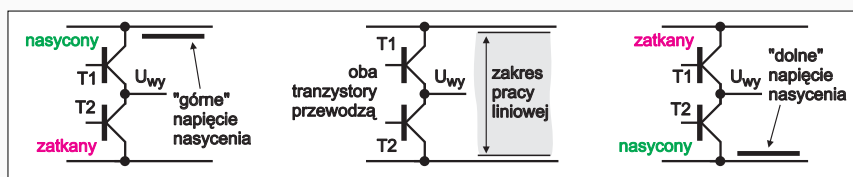


od potencjału ujemnej szyny zasilania.

– Gdy oba tranzystory przewodzą, mówimy o pracy liniowej. W zakresie pracy liniowej napięcie wyjściowe może zmieniać się pomiędzy maksymalną i minimalną wartością.

Ilustruje to **rysunek 10**.

Rys. 10



R E K L A M A