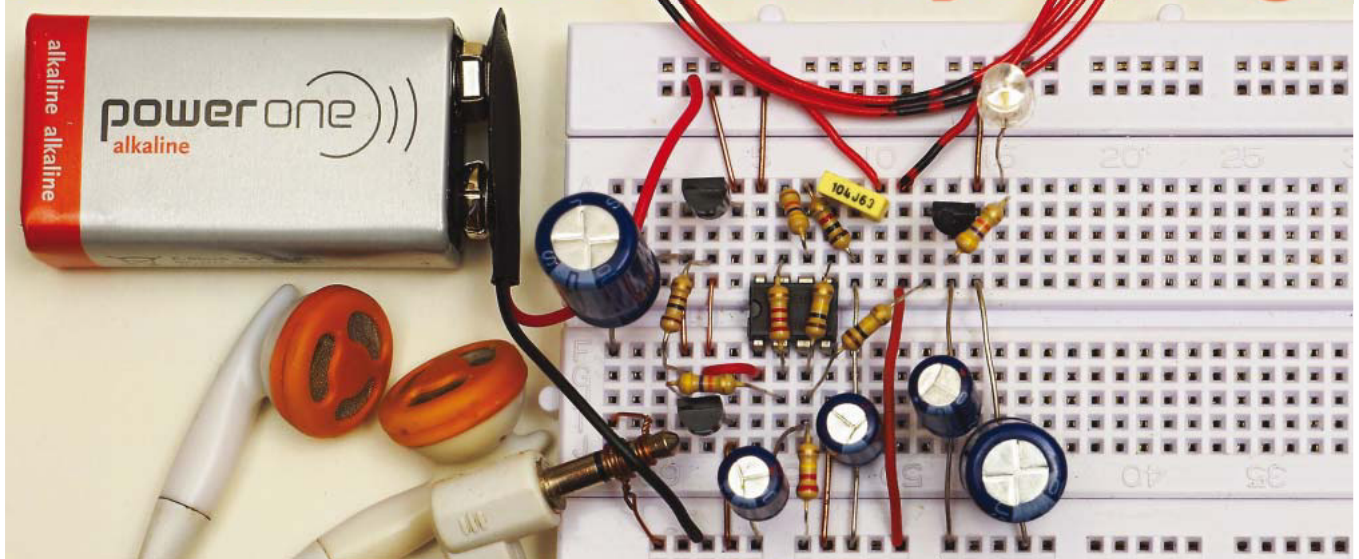


## PKE – Praktyczny Kurs Elektroniki

## Wykład 12

## Podstuchiwanie niestyszalnego



W poprzednim wykładzie proponowałem, żebyś nie demontował ostatnio budowanego dwustopniowego wzmacniacza. Ja wprawdzie zmontowałem ten układ jeszcze raz, co widać na fotografii tytułowej, ale Ty do wstępnych eksperymentów możesz wykorzystać ostatni układ z poprzedniego ćwiczenia (wg rysunku 31 i fotografii 32) z innymi czujnikami/przetwornikami na wejściu. Dobrze byłoby jednak, gdybyś wymienił kondensatory C2, C3, C4 z 10uF na 100uF – w związku z tą zmianą, po włączeniu zasilania musisz odczekać kilka, a może nawet ponad dziesięć sekund na ich naładowanie i dopiero potem układ będzie prawidłowo pracował. W razie potrzeby będziesz zmieniał czułość wzmacniacza, wymieniając R6 (100Ω...10kΩ) i R7 (1kΩ...10kΩ), ewentualnie także R1 (1kΩ...100kΩ). Na wejściu możesz włączyć najróżniejsze przetworniki, które zamieniają rozmaite wielkości fizyczne na sygnał elektryczny. Oto kilka moich propozycji:

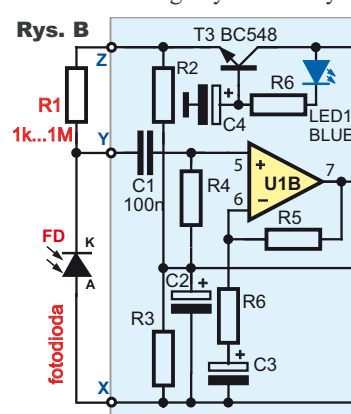
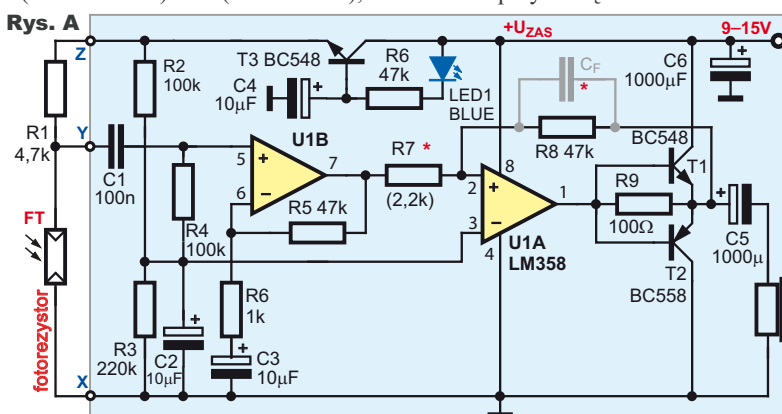
Na **rysunku A** niebieską podkładką zaznaczony jest nasz czuły wzmacniacz słuchawkowy, a literami X, Y, Z oznaczone są „punkty wejściowe”. Ten wzmacniacz będziemy wykorzystywać we wszystkich eksperymentach tego wykładu, dlatego na kolejnych schematach zamiast pełnego schematu znajdziesz tylko niebieską podkładkę z punktami wejściowymi X, Y, Z.

Dołączając do wejścia fotorezystor w miejsce mikrofonu, możesz „podstuchiwać światło”. Przy świetle sztucznym, w słuchawkach usłyszysz bardzo głośny terkot – przydźwięk sieci z żarówek i świetlówek

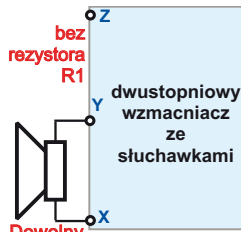
(będzie to brum o częstotliwości 100Hz). Możesz też spróbować „podstuchiwać”... płomienie ognia w kominku, ale efekt najprawdopodobniej nie będzie rewelacyjny. Układ może też pełnić jak najbardziej pożyteczną funkcję – jest testerem pilotów zdalnego sterowania od sprzętu RTV – wystarczy skierować podczerwoną diodę nadawczą pilota na fotorezystor i nacisnąć dowolny przycisk. Jeśli pilot pracuje, w słuchawkach pojawi się charakterystyczny terkot.

W układzie testera pilotów lepiej byłoby zamiast fotorezystora zastosować fotodiody według **rysunku B**. Jednak w zestawie EdW09 nie mamy fotodiody, czyli diody czulej na światło. Rolę fotodiody, ale o małej czułości i nie do testowania pilotów, mogłaby odgrywać czerwona dioda LED, włączona w kierunku zaporowym – do tego szczegółu jeszcze wrócimy.

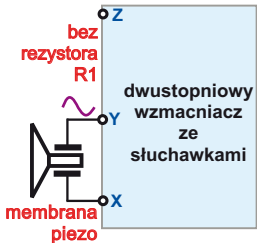
Po eksperymentach z fotoelementami zdemonstrowujemy polaryzujący rezystor R1. Prawdopodobnie u siebie lub u kogoś bliższego znajdziesz mikrofon dynamiczny (np. tani



mikrofon do karaoke). Mikrofonem dynamicznym jest też każdy klasyczny głośnik, co zresztą już wykorzystywaliśmy wcześniej (w wykładzie 9, fotografia 20). Możesz więc wykorzystać głośnik w roli mikrofonu według **rysunku C**. Co ciekawe, odwracalnym przetwornikiem elektroakustycznym jest też membrana piezoelektryczna. Jeżeli znajdziesz jakąś membranę piezo, np. od zegarka, grającej kartki jakiejś zabawki czy od syreny alarmowej, koniecznie wypróbuj ją w roli mikrofonu według **rysunku D**. Ale nie chodzi o brzęczyk piezo z zestawu EdW09, tylko o samą membranę – szczegóły w dalszej części wykładu. Membranę piezo możesz też wykorzystać w roli mikrofonu kontaktowego, wykrywającego drgania metalowych rur wodociągowych, szyb, betonowych ścian, itp. **Fotografia E** pokazuje układ z membraną piezo z tubą – jest to przetwor-



Rys. C



Rys. D

nik rodziny PCA-100, przeznaczony do syren alarmowych. W tym przypadku czułość jest ogromna, większa niż w wersji z mikrofonem elektretowym, dlatego potrzebne może okazać się zwiększenie rezystancji R6.

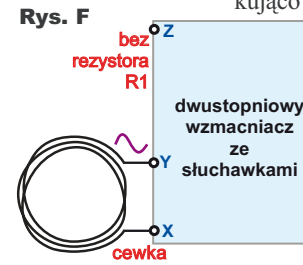
A teraz kluczowe propozycje tego wykładu: wykorzystaj nasz zasilany z baterii podsluch w nietypowej roli wykrywacza zmiennego pola magnetycznego i aparatu słuchowego. Zamiast mikrofonu włącz cewkę, zwierającą co najmniej kilka zwojów (czym więcej, tym lepiej) izolowanego drutu o dowolnej grubości – **rysunek F**. Jak widać na **fotografii tytułowej**, ja wykorzystałem cewkę o średnicy około 5cm, zawierającą tylko 4 zwoje. Już te cztery zwoje dały dobry efekt, jednak jeżeli to możliwe, Twoja cewka powinna mieć więcej zwojów – układ będzie jeszcze czulszy.

Zasil układ z baterii i zwracaj uwagę na dźwięk w słuchawkach, zbliżając sondę cewkę do różnego rodzaju urządzeń elek-

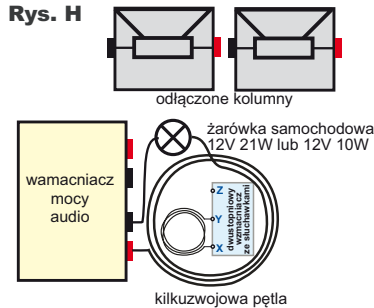
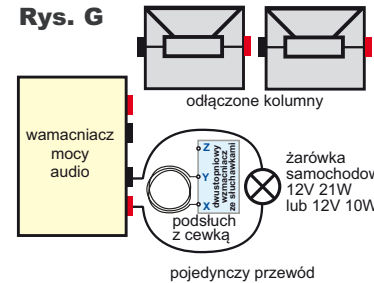
trycznych i elektrycznych, w szczególności do

różnych zasilaczy. Przekonasz się, że w ich pobliżu nasila się dźwięk – brum w słuchawkach. Pewien problem w tym, że indukowany w cewce pod wpływem zmiennego pola magnetycznego sygnał najczęściej ma częstotliwość sieci energetycznej, czyli tylko 50Hz. Jest to bardzo niski dźwięk, głębokie buczenie. Tak niskiego dźwięku nie usłyszysz w małym głośniczku. Masz szansę usłyszeć go w słuchawkach. Do takich eksperymentów, bardzo ważnych dla praktyka, jeszcze wrócimy. A wcześniej możesz zrealizować kolejne zaskakujące ćwiczenie. Jeżeli masz w zapasach żarówkę samochodową 12V/21W lub 12V/10W, to dołącz ją do wyjścia domowego wzmacniacza audio, odłączając współpracujące głośniki/kolumny. Stwórz pętlę, w której będzie płynął prąd zmienny i badaj pole magnetyczne wewnątrz i na zewnątrz pętli. Aby pętla miała sensowną wielkość, koniecznie wykorzystaj pojedynczy, jednożyłowy przewód, a nie dwużyłowy kabel według **rysunku G**. Możesz też wykorzystać dłuższy pojedynczy przewód i zwinąć go w pętlę – cewkę o 2...5 zwojach według **rysunku H**.

Wzmacniacz mocy audio dobrze byłoby nastawić na taką głośność, żeby żarówka leciutko się żarzyła, ale moc wyjściowa może też być mniejsza i efekt będzie zaskakująco dobry. W każdym razie przekonasz się, że wewnątrz i w pobliżu pętli nasz podsluch z cewką odbiera dźwięk ze wzmacniacza mocy. Dokładnie tak działa tzw. pętla indukcyjna dla słabosłyszących. Jeśli ktoś z Twojej rodziny (dziadek, babcia) ma aparat słuchowy z trzypozycyjnym przełącznikiem M, T, 0, przełącz aparat w pozycję T i wypróbuj w pętli z **rysunku G** lub **H**.

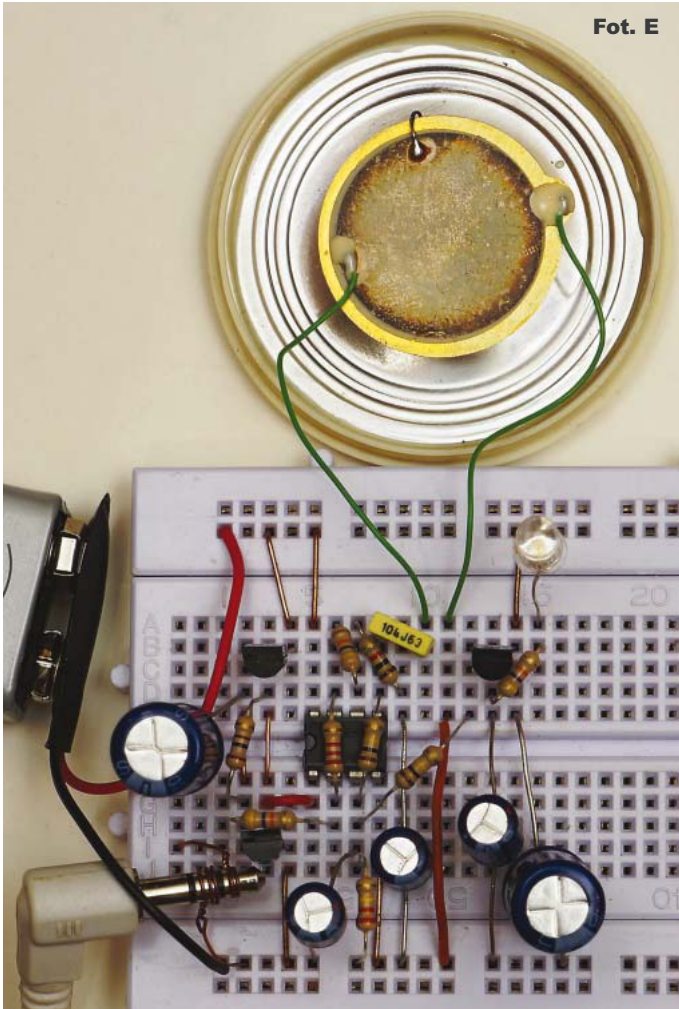


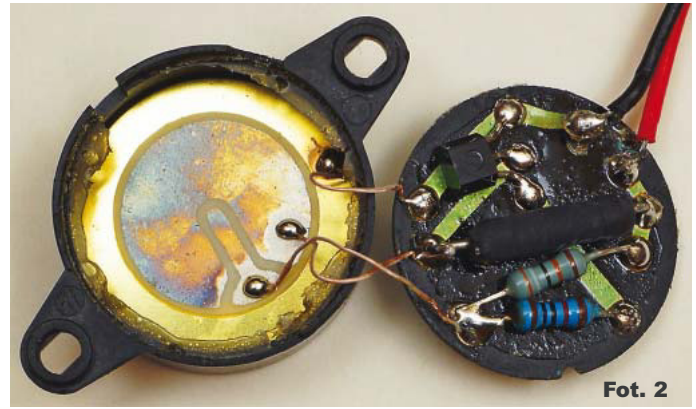
Rys. F



### Poznajemy elementy i układy elektroniczne

Podczas ćwiczeń wstępnych zachęcałem do wykorzystania *membrany piezo* w roli mikrofonu. Membrany piezo są powszechnie wykorzystane w roli głośniczków – brzęczyków oraz syren alarmowych – przykłady na **fotografii 1**. Membrany piezo znajdziesz w zegarkach, w „grających kartkach”, w multimetrach i wielu innych urządzeniach. Ale uwaga – występujący w zestawie EdW09 brzęczyk

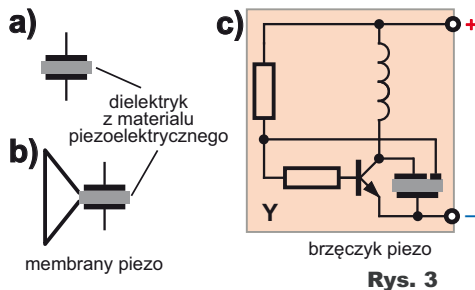




piezo (buzzer) oprócz membrany zawiera układ elektroniczny – **fotografia 2** pokazuje wnętrze brzęczyka z membraną piezo.

Pod względem elektrycznym membrana piezo jest rodzajem kondensatora (o znacznej pojemności rzędu 100nF), gdzie dielektrykiem jest materiał piezoelektryczny umieszczony między metalowymi okładkami. Materiał piezoelektryczny to taki, który odkształca się pod wpływem przyłożonego napięcia (pola elektrycznego), natomiast odkształcany wytwarza napięcie (pole elektryczne). Membrana piezo jest więc przetwornikiem odwracalnym – dwukierunkowym. Biegunowość nie ma znaczenia. Niektóre membrany mają przymocowaną tubę metalową lub plastikową, która zapewnia wytworzenie głośniejszego dźwięku, co można zilustrować jak na **rysunku 3a** i **3b**. Natomiast brzęczyk piezo z zestawu EdW09, oprócz membrany piezo z trzema wyprowadzeniami, zawiera generator sterujący z tranzystorem i jest elementem (układem) biegunowym. Przykładowy schemat masz na **rysunku 3c** – porównaj z fotografią 2.

Na pozór podobnie działa przetwornik dźwięku w mikrofonie elektretowym – tam też między okładkami kondensatora umieszczony jest „dziwny materiał”, ale nie piezoelektryk, tylko tak zwany elektret – materiał trwale naelektryzowany, elektryczny odpowiednik magnesu trwałego. Zasady działania membrany piezo i przetwornika elektretowego są inne. Przetwornik piezo do pracy zarówno w roli głośnika, jak też mikrofonu nie wymaga żadnych dodatkowych elementów, a przetwornik mikrofonu elektretowego to kondensator o bardzo małej pojemności;



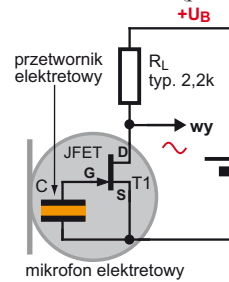
Rys. 3

**rysunek 4** pokazuje schemat wewnętrzny i układ pracy typowego mikrofonu elektretowego, gdzie kluczowym elementem jest tranzystor polowy JFET.

Wstępne ćwiczenia udowodniły, że nasz dwustopniowy układ jest uniwersalnym wzmacniaczem, który może znaleźć wiele interesujących zastosowań. Jednak skupmy się na ostatnich eksperymentach. Otóż dołączając do naszego podszluchu cewkę, wykonaliśmy czujnik **zmiennego pola magnetycznego**. Wcześniej, w wykładzie 7, dowiedzieliśmy się, że zakłócenia, w tym brum sieci 50Hz, mogą przedostawać się przez **pole elektryczne** i wszechobecne maleńkie pojemności. Teraz przekonaliśmy się, że zakłócenia i brum mogą przedostawać się także przez **pole magnetyczne** (i wszechobecne indukcyjności). Pole magnetyczne powstaje wszędzie tam, gdzie płynie prąd. „Odbiornikami” i „nadajnikami” pola magnetycznego są wszelkie cewki, w tym wszelkie pojedyncze pętle, czyli cewki jednozwojowe.

Każda cewka, a także każdy przewód, w którym płynie prąd (stały lub zmienny), wytwarza pole magnetyczne – stałe lub zmienne. Z drugiej strony, jeśli w **zmiennym** polu magnetycznym umieścimy dowolną cewkę (pętlę), to zaindukuje się w niej napięcie i może popłynąć prąd. Taki jest mechanizm przenoszenia za pomocą pola magnetycznego zarówno niepożądanych zakłóceń, jak też dźwięku w instalacji dla słabosłyszących.

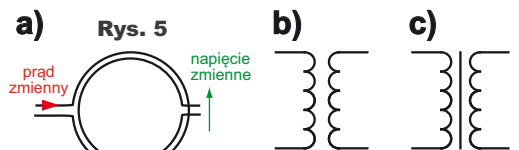
Umieszczając blisko siebie dwie cewki (często dodatkowo na wspólnym rdzeniu magnetycznym), otrzymujemy **transformator**. Zasada zilustrowana jest na **rysunku 5a**. Prąd zmienny płynący przez jedną z cewek, wytwarza pole magnetyczne. W tym polu umieszczona jest druga cewka, w której zmienne pole indukuje napięcie i umożliwia przepływ prądu, gdy



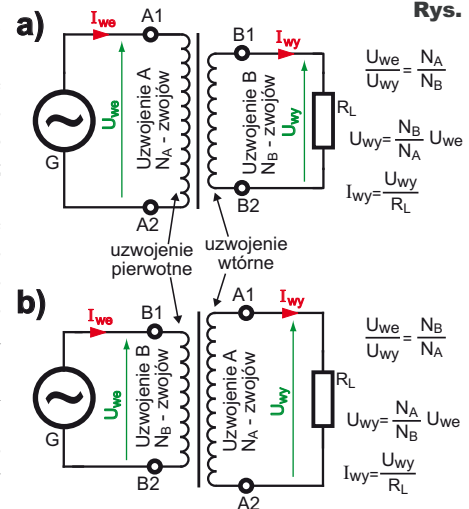
Rys. 4

obwód zostanie zamknięty. W rzeczywistości uzwojenia zawierają zwykle wiele zwojów, dlatego wykorzystujemy symbol transformatora jak na **rysunku 5b**. Większość transformatorów zawiera rdzeń magnetyczny, co zaznaczamy jak na **rysunku 5c**. Nie ma transformatorów prądu stałego, ponieważ napięcie w uzwojeniu wtórnym indukuje się tylko pod wpływem **zmian** pola magnetycznego.

Zgodnie z nazwą transformator służy do transformacji, czyli przekształcania, przemiany – w praktyce do zmiany wartości napięcia według zasady: wartości napięć (przebiegających) na wejściu i wyjściu są proporcjonalne do liczby zwojów uzwojeń, jak obrazuje to **rysunek 6**. Transformator może pracować „w obu kierunkach”, przy czym uzwojeniem pierwotnym nazywamy to, które jest podłączone do źródła napięcia zmiennego, natomiast uzwojeniem wtórnym to, do którego jest dołączone obciążenie. Stosunek liczby



Rys. 5



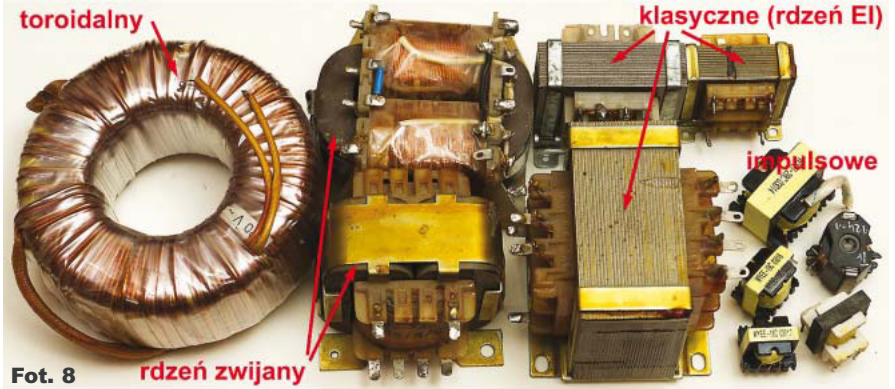
Rys. 6

zwojów uzwojenia pierwotnego do liczby zwojów uzwojenia wtórnego jest nazywana *przekładnią transformatora*. Zazwyczaj transformator służy do podwyższania lub obniżania napięcia, ale są też transformatory o przekładni 1:1, które nie zmieniają wartości napięcia, a ich jedynym zadaniem jest *oddzielenie galwaniczne* dwóch obwodów, potrzebne z uwagi na bezpieczeństwo (transformatory separacyjne 230V/230V 50Hz) lub zmniejszenie wpływu zakłóceń (np. transformatoriki separacyjne w profesjonalnym sprzęcie audio).

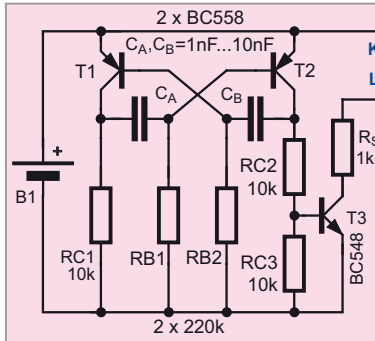
W idealnym transformatorze cała moc dostarczona do uzwojenia pierwotnego zostalaby bez strat dostarczona do uzwojenia wtórnego i dalej do otoczenia – **rysunek 7a**. Z uwagi na straty w rezystancji miedzianych uzwojeń, a także straty w rdzeniu, część mocy, zwykle kilka procent, jest marnowana w transformatorze w postaci ciepła, jak ilustruje **rysunek 7b**. Sprawność transformatorów, oznaczana małą grecką literką eta, ( $\eta = P_{wy}/P_{we}$ ), wynosi zwykle ponad 90%. Między innymi po to, by zmniejszyć straty i poprawić inne właściwości, w transformatorze cewki są umieszczone bardzo blisko siebie i dodatkowo często zastosowany jest rdzeń.

Transformatory niskich częstotliwości, zarówno zasilające sieciowe 50Hz, jak i transformatory audio (20Hz...20kHz), mają rdzenie z blach magnetycznych, często z tzw. permaloju. Dla częstotliwości rzędu kiloherców i pojedynczych megaherców są to rdzenie z różnego rodzaju ferrytu – twardego ceramicznego spieku materiałów o właściwościach ferromagnetycznych. Natomiast w zakresie wysokich częstotliwości, rzędu wielu megaherców, często wykorzystujemy transformatory bez rdzenia (z rdzeniem powietrznym).

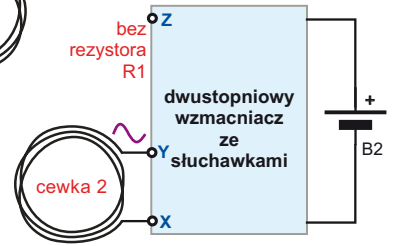
Co ważne także z uwagi na zakłócenia, część pola magnetycznego, wytwarzanego przez uzwojenie pierwotne transformatora, nie obejmuje uzwojenia wtórnego, tylko niejako „ucieka na zewnątrz”. Jest to szkodliwe tzw. *pole rozproszenia*, będące przyczyną zakłóceń – brumu w licznych układach. **Fotografia 8** pokazuje różne transformatory zasilające (50Hz) oraz inne transformatory (impulsowe), pracujące przy wyższych częstotliwościach. Największe pole rozproszenia mają klasyczne transformatory z rdzeniem EI, a najple-



Fot. 8 rdzeń zwijany



Rys. 9



sze, najmniej „śmiejące” są transformatory toroidalne. Podczas ćwiczeń tego wykładu możesz przekonać się o tym osobiście. Temat jest bardzo ważny dla praktyka, więc w następnym wykładzie zajmiemy się tym zagadnieniem znacznie dokładniej.

A teraz w ramach ćwiczeń zrealizujemy najprawdźwisiwy transformator powietrzny. Do wejścia naszego wzmacniacza dołącz kilkuzwojową cewkę (rysunki A i F). Dodatkowo zrealizuj też prosty generator według **rysunku 9**. Dodatkowy tranzystor T3 jest „stopniem mocy”, a prąd wyjściowy ogranicza rezystor  $R_S$ . Mój model pokazany jest na **fotografii 10**. Kondensatory  $C_A$ ,  $C_B$  mogą mieć po 1nF (102) lub 10nF (103) – w moim modelu jeden ma 1nF, drugi 10nF. Do punktów K, L dołącz kilkuzwojową cewkę.

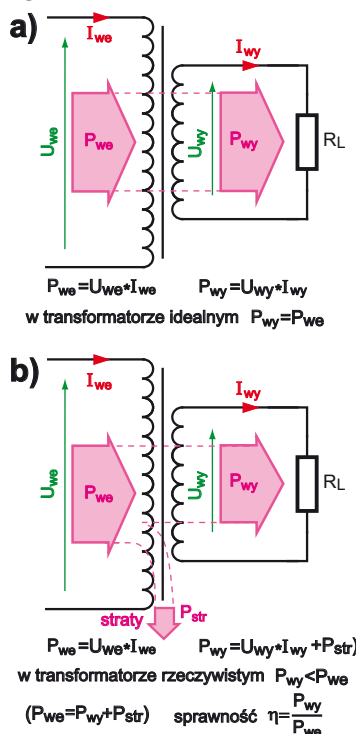
Aby uniknąć wzajemnego wpływu obu układów, **zasil wzmacniacz i generator z dwóch oddzielnych źródeł**. Żółte strzałki na fotografii wskazują miejsca, gdzie pomiędzy zasilaniem jest przerwa, umożliwiająca zasilanie obu bloków z oddzielnych źródeł. Gdy zbliżysz cewki do siebie, w słuchawkach usłyszysz pisk generatora, prze-

chodzący przez prymitywny transformator powietrzny. U mnie uzwojenie pierwotne ma 6 zwojów, wtórne 4 zwoje. Właśnie z uwagi na to ćwiczenie przebudowałem nasz dwustopniowy wzmacniacz – układ podsluchowy z poprzedniego wykładu, by miał jak najbardziej zwartą, kompaktową budowę i aby był na skraju płytki, z dala od generatora.

Na początku niniejszego wykładu wspominałem, że funkcję fotodiody może pełnić dioda LED. „Prawdziwa”, krzemowa fotodioda reaguje na światło widzialne i podczerwień. Dioda LED będzie reagować na światło o długości fali mniejszej, niż ona sama wytwarza. Dlatego musiałyby to być **czerwona dioda LED**, bo inne będą jeszcze mniej czułe, ale soczewka powinna być bezbarwna, by przepuszczała światło o wszystkich długościach fali. Zbuduj układ według **rysunku 11**, gdzie funkcję fotodiody pełni czerwona struktura trzykolorowej diody RGB z zestawu EdW09. Dioda ta jest włączona w kierunku wstecznym, struktury zielona i niebieska nie są wykorzystywane. Wartość rezystora polaryzacyjnego R1 zwiększamy do 100kΩ i dołączamy go od strony masy (diodę LED RGB i rezystor R1 można byłoby równie dobrze zamienić miejscami). Nasza improwizowana „fotodioda” (LED2) będzie reagować na światło niebieskiej diody LED1, dołączonej do punktów K, L. Niebieskie światło zmienia wartość tzw. prądu wstecznego naszej fotodiody, co wywołuje zmiany napięcia na wejściu Y wzmacniacza podsluchowego.

Dla pewności również zasilaj wzmacniacz i generator z oddzielnych źródeł. W słuchawkach, zależnie od wartości pojem-

Rys. 7

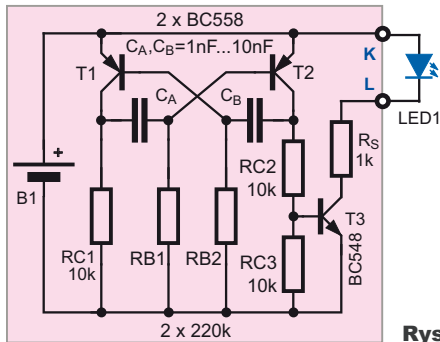


ności  $C_A = C_B$  w generatorze ( $1nF...1\mu F$ ), usłyszysz pisk lub terkot. Mój model pokazany jest na **fotografii 12**. A jeżeli mamy do dyspozycji wzmacniacz o ogromnym wzmocnieniu, to możemy zająć się kolejnym ważnym zagadnieniem:

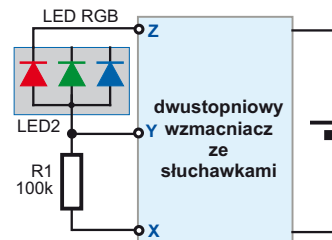
### Zapomniane rezystancje.

Rysując na schemacie ideowym połączenia między elementami, milcząco zakładamy, że mają zerową oporność. Nie zastanawiamy się nad tym, że przecież będą one fizycznie zrealizowane w postaci przewodów czy ścieżek na płytce drukowanej, a tym samym, że ich oporność nie będzie zerowa. Faktem jest, że w większości obwodów nie trzeba zwracać szczególnej uwagi na oporności połączeń. Jednak niezerowe, często stosunkowo duże oporności ścieżek i przewodów mogą mieć bardzo negatywny wpływ na parametry wielu układów, zwłaszcza wszelkich (przed) wzmacniaczy oraz układów pomiarowych.

Warto pamiętać, że warstwa miedzi na płytce drukowanej jest bardzo cienka, typowo ma grubość 0,035mm. Programy do komputerowego projektowania płytek często jako domyślnie proponują ścieżki o szerokości 10 milów, czyli 0,254mm (1 mil to 1/1000 cala, czyli 0,0254mm). Przekrój wynosi wtedy tylko 0,009mm<sup>2</sup>. 10 centymetrów takiej ścieżki ma rezystancję około 200 miliomów, czyli 0,2 oma, a



Rys. 11



przepływ prądu 100mA wywołałby na niej spadek napięcia aż 20mV. W wielu zastosowaniach to niedopuszczalnie dużo! Przy projektowaniu płytek drukowanych trzeba pamiętać o tej ważnej sprawie!

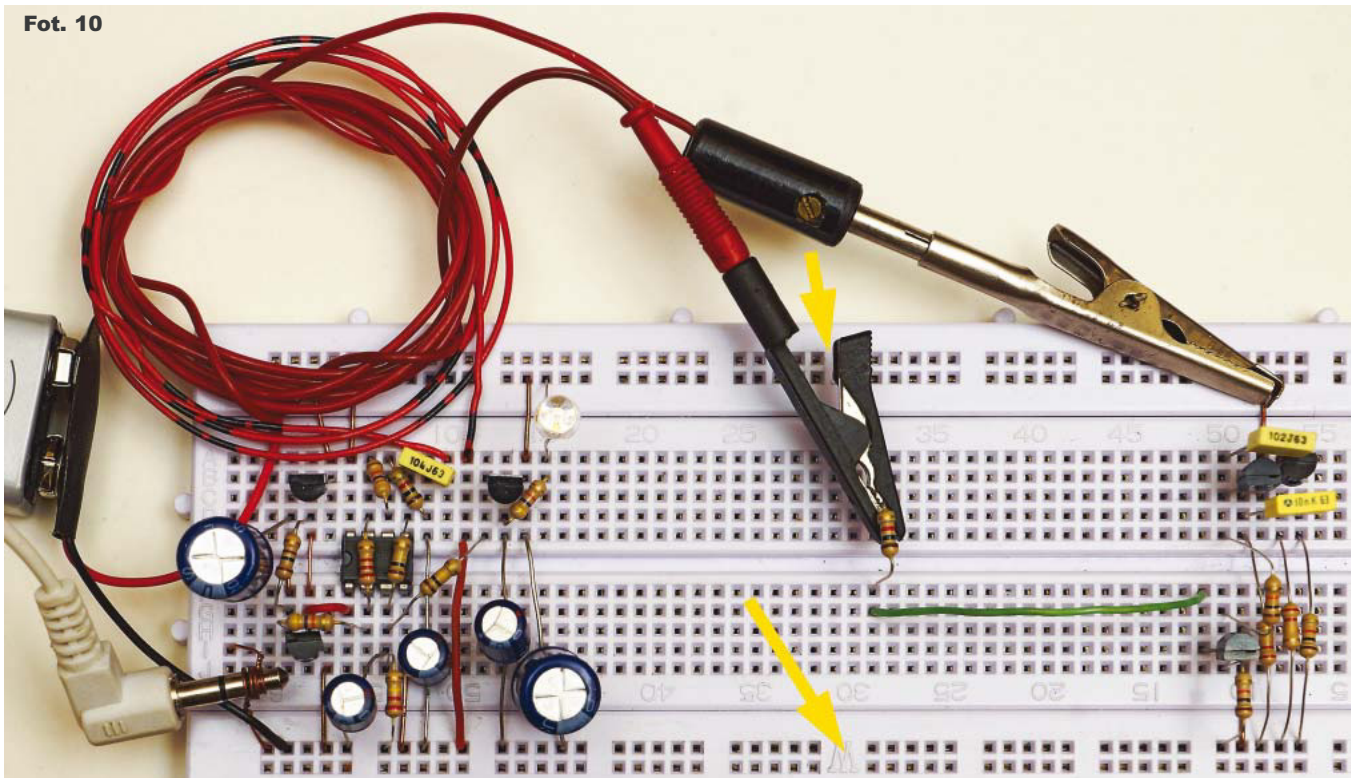
Oto inny przykład z życia wzięty: cienki drucik miedziany o średnicy 0,5mm ma przekrój 0,2mm<sup>2</sup> i 10cm takiego drutu ma rezystancję około 0,0085Ω, czyli 8,5mΩ. Prąd 100mA wywoła na tej rezystancji spadek napięcia 0,85mV. Na pozór niewiele, jednak nawet tak małe spadki napięcia mogą być przyczyną kłopotów. Co ciekawe, takie, a nawet jeszcze mniejsze spadki napięć możemy mierzyć za pomocą wzmacniacza operacyjnego.

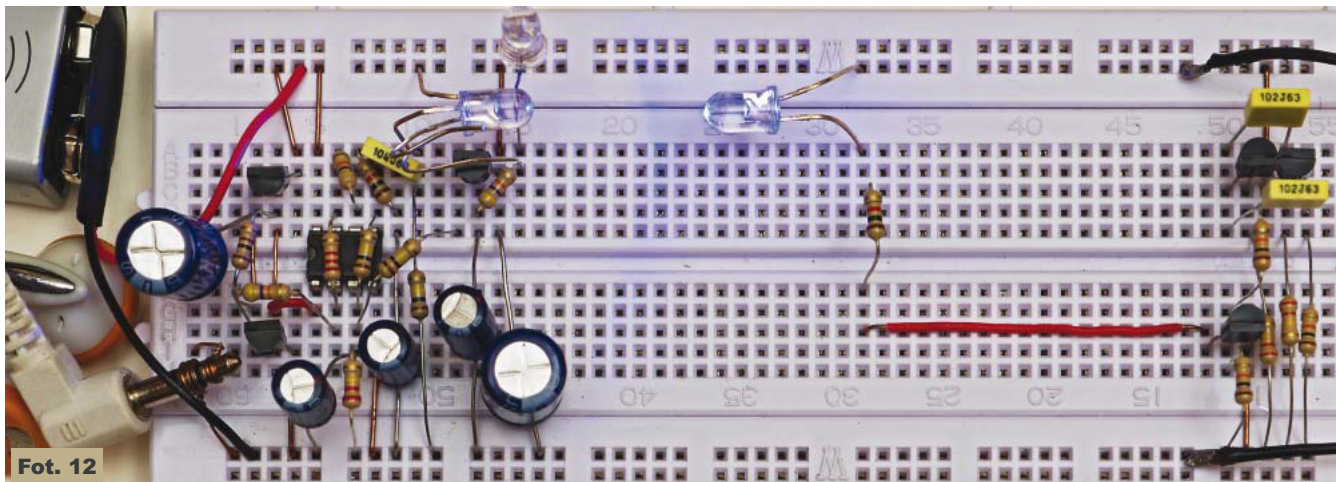
**Superczuły miernik prądu.** Wykorzystajmy teraz nasz czuły wzmacniacz do „podsluchiwania prądu”, a ściślej do badania spadków napięć na przewodach i stykach. Będziemy monitorować zmiany poboru prądu naszego prostego multiwibratora z diodą LED, mierząc spadek napięcia na maleńkiej rezystancji, jaką ma kilkucenty-

metry odcinek drutu w układzie z **rysunku 13**. Abyś nie miał żadnych wątpliwości, część pomiarowa powinna być zasilana z jednej baterii, a generator z diodą LED – z innej. Wykorzystaj dwie baterie (akumulatory) o napięciu 7...15V, ale nie podłączaj zasilacza, bo będziesz miał kłopot z dodatkowymi zakłóceniami, przychodzącymi przez zasilacz z sieci (jeśli nie wierzysz, że tak będzie – sprawdź).

Mam nadzieję, że przy zwarceniu punktów wejściowych X, Y, wzmacniacz nie wzbudzi się, a w słuchawkach będziesz słyszeć tylko nieunikniony szum, ale bez żadnego pisku czy terkotu. Gdyby przy zwarceniu wejścia pojawił się terkot lub pisk, trzeba zmontować układ w inny sposób i inaczej poprowadzić obwód masy, by usunąć problemy, które mają być badane w tym ćwiczeniu. W moim modelu, pokazanym na **fotografii 14**, nieprzypadkowo zasilanie wzmacniacza zostało dołączone do punktów, wskazanych niebieskimi strzałkami. Do tych eksperymentów zmieniłem też miejsce dołączenia kondensatora filtrującego C6. Taki model nie sprawiał kłopotów przy zwarceniu punktów X, Y i można było dołączyć te punkty do punktów C, D generatora. Po włączeniu zasilania generatora, w słuchawkach pojawia dość głośny pisk – wzmocniony spadek napięcia na kawałeczku drutu.

Fot. 10





Fot. 12

W obwodzie masy generatora celowo umieściliśmy dodatkową rezystancję kawałka drutu. U mnie jest to około 5cm drutu o średnicy 0,5mm (w zielonej izolacji), więc spodziewana rezystancja wynosi około 4 miliomów ( $0,004\Omega$ ), co przy prądzie rzędu 10mA daje spadek napięcia około 40 mikrowoltów ( $0,00004V$ ). Wyraźny dźwięk w słuchawkach świadczy, że nasz wzmacniacz – podsluch dobrze radzi sobie ze wzmacnianiem bardzo małych napięć zmiennych!

Zwróć uwagę, że przy połączeniu według rysunku 13 i fotografii 14, nasz podsluch monitoruje spadek napięcia tylko na rezystancji drutu (w zielonej izolacji), czyli między punktami C – D.

A rezystancja płytki stykowej i spadek napięcia na niej?

Dołącz punkt Y do punktu A – wtedy sprawdzisz spadek napięcia na rezystancjach płytki stykowej między punktami A – C. I co? Jesteś zaskoczony?

Oto kolejny temat ogromnie ważny dla każdego praktyka, więc starannie zbadaj spadki napięć w obwodzie masy, dołączając wejścia X, Y do dowolnych punktów generatora oznaczonych literami A, B, C, D, E, F. Przy zasilaniu wzmacniacza i generatora z oddzielnych bato-

rii, punkty X, Y możesz też dołączać do dowolnych innych ścieżek i styków układu generatora, by zbadać występujące na nich spadki napięć.

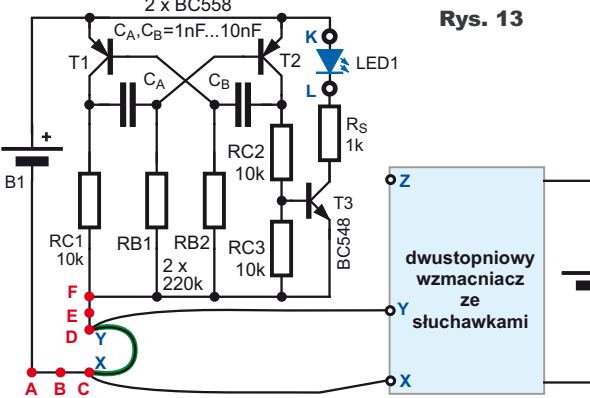
A może chciałbyś jeszcze bardziej wzmacnić sygnał?

Teoretycznie wystarczyłoby zmienić wartości R5...R8 według idei z **rysunku 15**. Oba stopnie miałyby wzmacnienie po 10000 razy (80dB), co w sumie dałoby gigantyczne wzmacnienie 100 milionów razy (160dB).

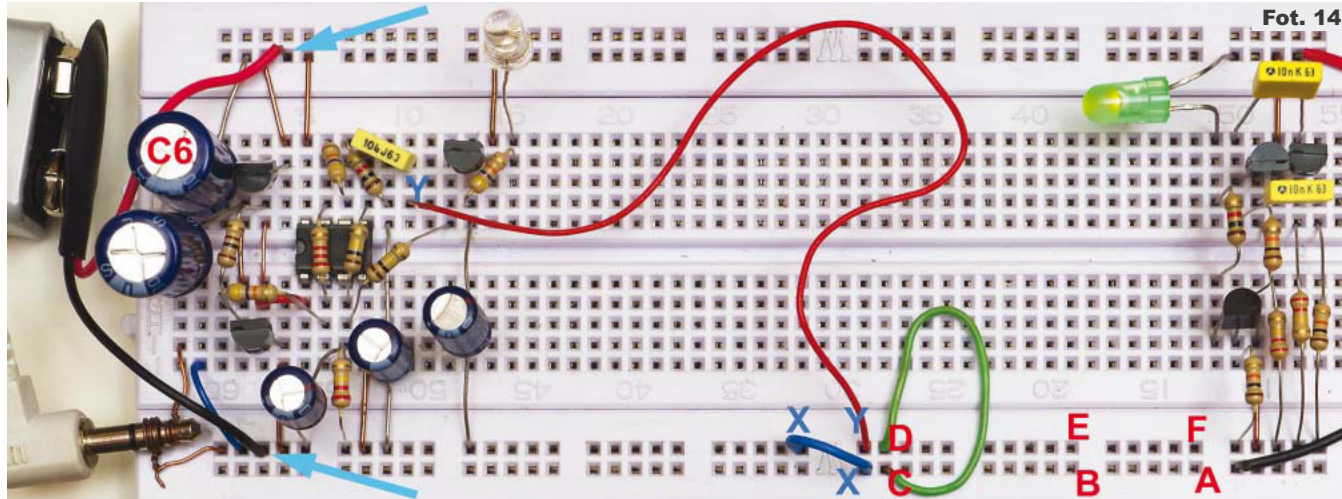
Niestety, nie uda się to, i to z kilku powodów, które omówimy w dalszych wykładach. A na razie omówmy tylko jeden, wynikający ze wspomnianego wcześniej

wejściowego napięcia niezrównoważenia (offsetu) wzmacniaczy operacyjnych. Jak wiemy, niedoskonała symetria stopni wejściowych wzmacniacza operacyjnego objawia się tym, że podczas normalnej pracy wzmacniacza operacyjnego napięcie między wejściami nie jest równe zero, tylko musi tam występować niewielkie napięcie stałe, dodatnie lub ujemne. Jak już wiesz z wykładu 11, w kostkach LM358 według katalogu typowo wynosi ono 2mV, maksymalnie w nielicznych egzemplarzach do 7...9mV. **Rysunek 16** pokazuje „dodatnie” i „ujemne” napięcie niezrównoważenia w dwóch przykładowych egzemplarzach wzmacniacza, pracujących w roli wtórnika.

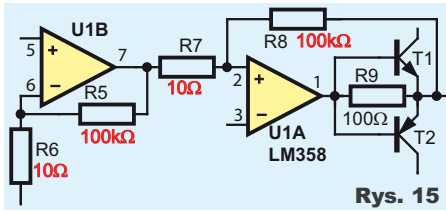
Problem w tym, że to napięcie niezrównoważenia jest wzmacniane. (Wejściowe) napięcie niezrównoważenia dla danego egzemplarza jest niezmiennie (pomijając jego dryft cieplny), ale na wyjściu musi się ustalić odpowiednie *napięcie stałe*, aby zapewnić prawidłową pracę wzmacniacza. Przykładowa sytuacja dla wzmacniacza nieodwracającego jest pokazana na **rysunku 17**. Jak widać, przy dużym wzmacnieniu, na wyjściu potrzebne byłoby *spoczynkowe napięcie stałe* o niedopuszczalnie



Rys. 13



Fot. 14



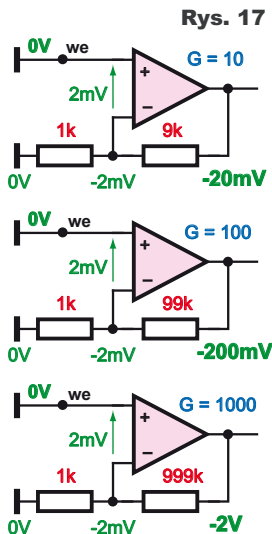
Rys. 15

dużej wartości. Ten sam problem dotyczy wzmacniacza odwracającego – rysunek 18.

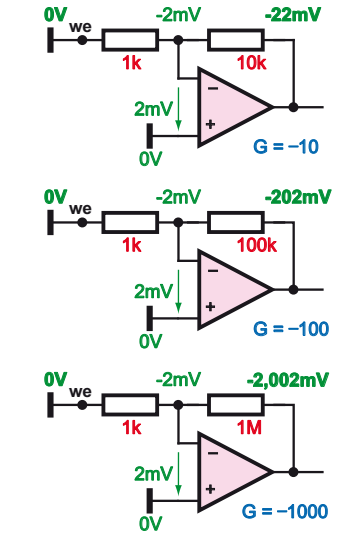
Problem można łatwo wyeliminować, gdy ma to być wzmacniacz sygnałów zmiennych – wystarczy włączyć kondensator o odpowiednio dużej pojemności według rysunku 19 – wtedy dla prądów stałych wzmacniacz jest wtórnikiem i problemu offsetu nie ma – patrz rysunek 16.

W naszym wzmacniaczu podsluchowym pierwszy stopień już pracuje w takiej konfiguracji, więc wystarczy w drugim stopniu dodać kondensator C7 w szereg z rezystorem R7. Pojemności C3, C7 muszą być odpowiednio duże, żeby dolna częstotliwość graniczna była odpowiednio niska.

I oto nauczyliśmy się zreczenie omijać problem napięcia niezrównoważenia, ale tylko we wzmacniaczu napięć zmiennych. Jednak trzeba z nim walczyć inaczej, gdybyśmy chcieli zrealizować bardzo czuły wzmacniacz napięć stałych, na przykład do wzmacniania napięcia z termopar, służących do pomiaru temperatury. Termopara to połączenie dwóch różnych metali, dające na wyjściu niewielkie napięcie stałe. Fotografia 20 pokazuje cztery różne termopary. Niestety, czułość przetwarzania termopar jest mała, wynosi od 10uV/°C do co najwyżej 100uV/°C, więc napięcie stałe, uzyskiwane z termopary, też jest małe, często rzędu pojedynczych miliwoltów. Do jego wzmocnienia potrzebne są precyzyjne i stabilne wzmacniacze

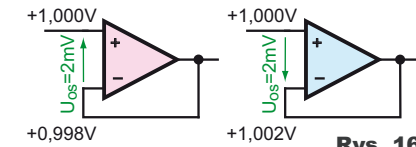


Rys. 17



Rys. 18

ukła-



Rys. 16

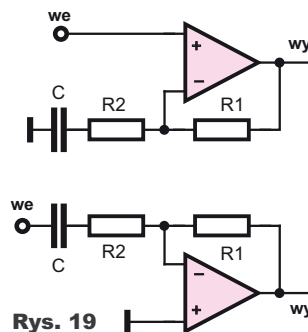
napięć stałych. W najprostszym przypadku może to być wzmacniacz stałoprądowy, zasilany napięciem symetrycznym, na przykład według rysunku 21a, a jeśli użyjemy wzmacniacza, którego wejście i wyjście może pracować na poziomie ujemnej szyny zasilania (np. nasz LM358), możemy zasilac napięciem pojedynczym według rysunku 21b. W takich wzmacniaczach stałoprądowych problem napięcia niezrównoważenia występuje z całą ostrością.

Przed wszystkim trzeba jednak wiedzieć, że praktycznie we wszystkich pojedynczych wzmacniaczach operacyjnych dwie z trzech „wolnych” końcówek (nóżki 1, 5, 8 – patrz rysunek 5 w wykładzie 11) przeznaczone są do korekcyjnej symetrii i tym samym do zerowania napięcia niezrównoważenia. Rysunek 22 pokazuje sposoby włączenie potencjometru korekcyjnego w popularnych wzmacniaczach TL061/TL071/TL081 oraz OP27 i NE5534.

W praktyce stosuje się też inne sposoby. We wzmacniaczu odwracającym i wszelkich pokrewnych zasilanych napięciem symetrycznym stabilizowanym naturalny wydaje się sposób z rysunku 23a, gdzie wprost na wejście nieodwracające podaje się napięcie korekcyjne, równe napięciu niezrównoważenia Uos. W praktyce napięcie takie uzyskuje się w

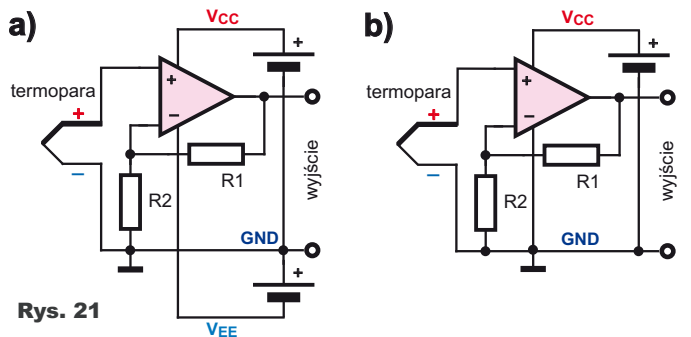
dzie z rysunku 23b na małym rezystorze RA w dzielniku, zasilanym z potencjometru montażowego. Jednak w praktyce najprostszy okazuje się sposób z rysunku 23c. We wzmacniaczu nieodwracającym należałoby podać napięcie równe napięciu niezrównoważenia według rysunku 24a. W praktyce można to zrealizować według rysunku 24b, a we wtórniku według rysunku 24c, pamiętając o wpływie dodatkowych rezystancji na wartość wzmocnienia. Trudniejsze może się okazać wykorzystanie pokazanych sposobów przy zasilaniu napięciem pojedynczym, ponieważ napięcie niezrównoważenia może być „dodatnie” lub „ujemne” – wtedy warto skorzystać ze sposobu z rysunku 22.

Proste sposoby z rysunków 22...24 likwidują problem napięcia niezrównoważenia, jednak nie usuwają pokrewnego problemu dryftu cieplnego napięcia niezrównoważenia. W popularnych wzmacniaczach dryft ten ma wartość około 10 mikrowoltów na stopień Celsjusza, więc przy zmianie temperatury o 20 stopni napięcie niezrównoważenia zmienia się o 0,2mV. Na pozór niewiele, ale zostanie to pomnożone przez wzmocnienie stałoprądowe. W praktyce właśnie dryft napięcia niezrównoważenia ogranicza od dołu zakres mierzonych napięć stałych. Nie ma prostego sposobu na dryft cieplny. Teoretycznie można byłoby wzmacniacz umieścić w termostacie, ale i to nie wyeliminowałoby kolejnego problemu – drobnych długookresowych zmian napięcia niezrównoważenia wskutek starzenia. W niektórych katalogach podawane są informacje także o stabilności długoczasowej napięcia

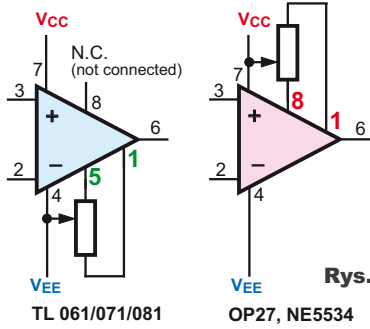


Rys. 19

Fot. 20



Rys. 21



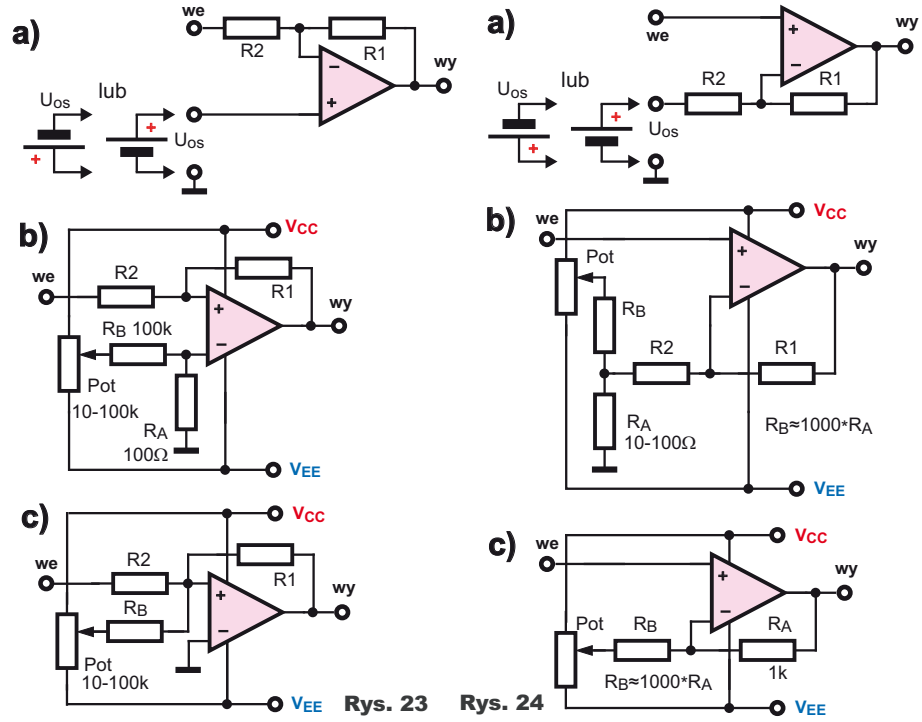
Rys. 22  
TL061/071/081  
OP27, NE5534

niezrównoważenia (w mikrowoltach na miesiąc). Dotyczy to jednak tak zwanych wzmacniaczy precyzyjnych. W tabeli 1 podane jest porównanie wchodzących tu w grę parametrów kilku wzmacniaczy, w tym naszego wzmacniacza LM358 i popularnych precyzyjnych OP07 i OP177. Dwa ostatnie (MAX44251 i OPA734) to precyzyjne wzmacniacze operacyjne z dodatkowymi wewnętrznymi obwodami, które podczas pracy na bieżąco korygują napięcie niezrównoważenia i kompensują jego zmiany cieplne, a przy okazji także część szumów.

Jeśli masz woltomierz (multimetr) i chcesz sprawdzić wartość i „biegunowość” napięcia niezrównoważenia swojego wzmacniacza, możesz wykorzystać układ według rysunku 25a lub ewentualnie według rysunku 25b, byle tylko wyjście nie weszło w stan nasycenia. W układzie z rysunku 25b wzmacniacz oznaczony X jest wtórnikiem, wytwarzającym napięcie sztucznej masy na poziomie połowy napięcia zasilania. Skrót DUT (*Device Under Test*) wskazuje testowany wzmacniacz. Jego wejściowe napięcie niezrównoważenia jest wzmacniane 1000-krotnie (teoretycznie 1001-krotnie, zgodnie z rysunkiem 18, ale tolerancja rezystorów R1, R2 uniemożliwia taką dokładność). Fotografia 26 pokazuje, że jeden z moich wzmacniaczy LM358, testowany w układzie według rysunku 25a, ma napięcie niezrównoważenia około 1,3mV (1309mV/1000). Tylko jeden z kilkunastu badanych wzmacniaczy miał napięcie niezrównoważenia większe (1,7mV), natomiast wszystkie pozostałe miały napięcie niezrównoważenia poniżej 1mV, niektóre około 0,1...0,2mV.

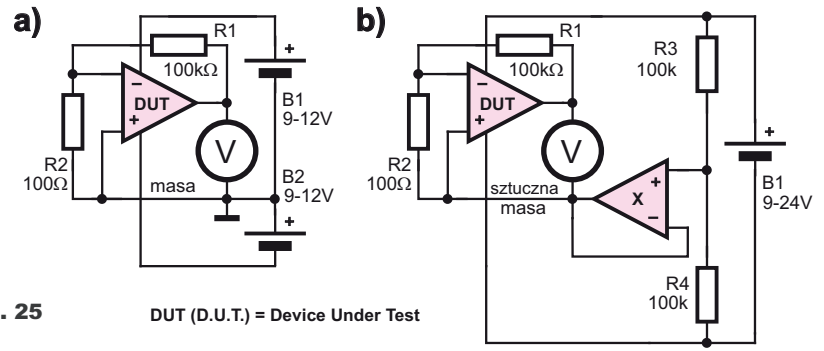
W następnym wykładzie będziemy się zajmować problemem zakłóceń i szumów, a także kolejnymi aspektami niedoskonałości wzmacniaczy operacyjnych.

Piotr Górecki

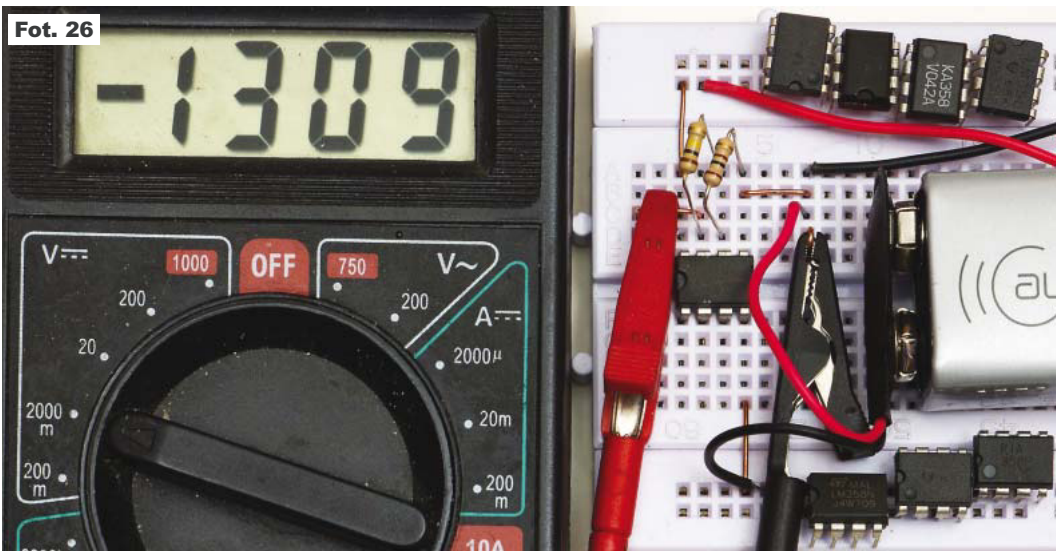


Rys. 23 Rys. 24

Tabela 1	Wzmacniacze operacyjne	Klasyczne						z obwodami autozerowania			
		LM358		OP07		OP177F		MAX44251		OPA734	
Parametr		typ.	max	typ.	max	typ.	max	typ.	max	typ.	max
napięcie niezrównoważenia $U_{os}$ [uV]		2000	7000	30	75	10	25	3	6	1	5
dryft cieplny $U_{os}$ [uV/°C]		7	?	0,3	1,2	0,1	0,3	0,005	0,019	0,01	0,05
stabilność długoczasowa $U_{os}$ [uV/miesiąc]		?	?	0,3	1,5	0,3	?	nie dotyczy			



Rys. 25 DUT (D.U.T.) = Device Under Test



Fot. 26