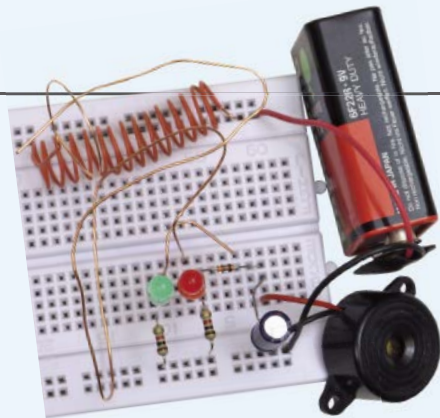




PRAKTYCZNY KURS cz. 13 ELEKTRONIKI



Oto trzynasta 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, 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 **platce 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 28 lutego 2014 roku, to zestaw **EdW09** wyślemy Ci w połowie marca 2014 wraz z marcowym 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 prześląż nauczycielom informację o **Praktycznym Kursie Elektroniki** z promocyjnymi dostawami **Pakietów Szkolnych PS EdW09** do ćwiczeń praktycznych.

Zestaw EdW09 zawiera następujące elementy (specyfikacja rodzajowa):

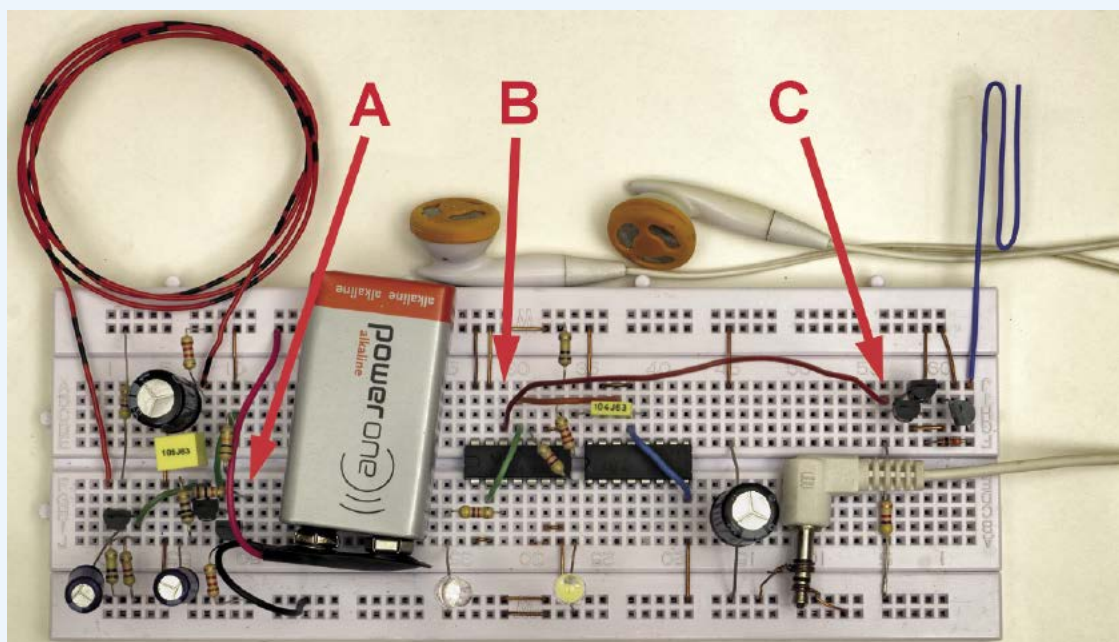
- | | |
|--------------------------------|-----------|
| 1. Diody prostownicze | 4 szt. |
| 2. Układy scalone | 4 szt. |
| 3. Tranzystory | 8 szt. |
| 4. Fotorezystor | 1 szt. |
| 5. Przekaznik | 1 szt. |
| 6. Kondensatory | 22 szt. |
| 7. Mikrofon | 1 szt. |
| 8. Diody LED | 11 szt. |
| 9. Przewód | 1 m |
| 10. Mikroswitch | 2 szt. |
| 11. Piezo z generatorem | 1 szt. |
| 12. Rezystory | 64 szt. |
| 13. Srebrzanka | 1 odcinek |
| 14. Zatrzaśk 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%.

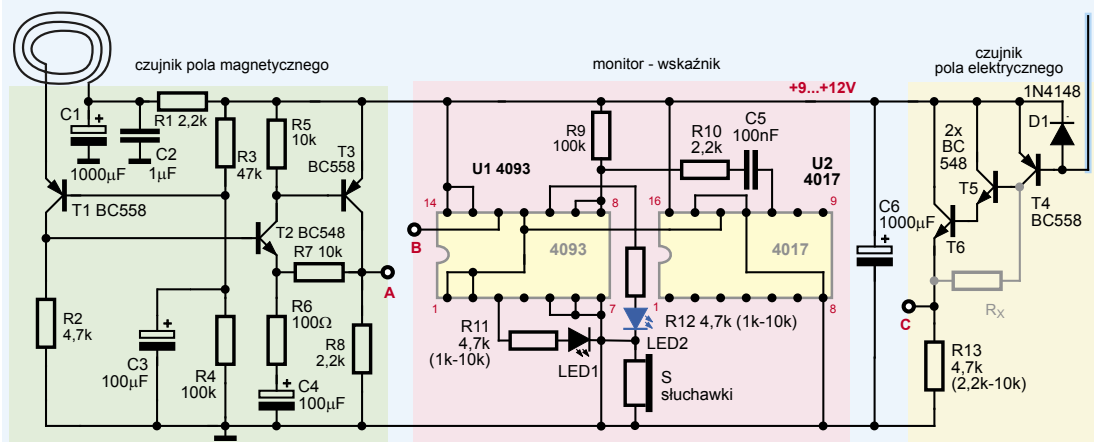
Autorem **Praktycznego Kursu Elektroniki** jest **Piotr Górecki**, redaktor naczelny kultowego w świecie hobbystów – elektroników miesięcznika „Elektronika dla Wszystkich” i autor legendarnych cykli artykułów i książek uczących elektroniki od podstaw.



Projekt 13

Problemy z brumem i ekranowanie. Ultraczułe wykrywacze

W poprzednim odcinku do wejścia superczułego wzmacniacza podsluchowego dołączaliśmy różne przetworniki. Między innymi prosty czujnik zmiennego pola magnetycznego. Ponieważ temat ten jest ogromnie ważny w praktyce, trzeba go zbadać dokładniej. Koniecznie zbuduj trzy proponowane w tym wykładzie wykrywacze i starannie przeprowadź proponowane testy! Na pewno będziesz zdziwiony i dużo się nauczysz.



A



Na fotografii wstępnej masz rozbudowaną wersję wykrywacza pól magnetycznych i elektrycznych. Z lewej strony płytki zamontowany jest czujnik zmiennych pól magnetycznych z kilkunastozwojową pętlą – cewką. Z prawej strony płytki zamontowany jest wykrywacz pól elektrycznych z antenką z drutu. Wyjście jednego z tych wykrywaczy połączysz z wejściem monitora. W monitorze wskaźnikami są słuchawki oraz dwie kontrolki LED.

Opis układu dla „zaawansowanych”

Nasz podwójny wykrywacz zrealizowany według rysunku A zawiera trzy bloki: **czujnik pola magnetycznego** (zielona podkładka), **czujnik pola elektrycznego** (niebieska podkładka) oraz wyróżniony różową podkładką wspólny **monitor**. W testach nie będziemy wykorzystywać obu czujników jednocześnie. Do wejścia monitora, czyli do punktu B, dołączymy albo punkt A, albo punkt C.

Monitor zasadniczo można byłoby ograniczyć tylko do słuchawek. Ale gdy będziesz badać pola magnetyczne wokół nowoczesnych urządzeń z zasilaczami (przetwornicami) impulsowymi, to ich częstotliwości pracy są rzędu kilkudziesięciu kiloherców, a nawet ponad 100 kHz, a więc są niesłyszalne dla ucha. Aby wykryć takie szybkozmienne pola, dodany jest dzielnik częstotliwości.

Kostki U1, U2 to tzw. układy cyfrowe, których działanie będziemy omawiać w dalszych wykładach kursu. W każdym razie układ U2 (4017) jest dzielnikiem częstotliwości przez 10. Na jego nóżkę 14 podajemy sygnał wejściowy, przychodzący z punktu B, a na nóżce 12 otrzymujemy przebieg o częstotliwości 10-krotnie mniejszej. Sygnał z wejścia B po przejściu przez część układu U1 jest podany przez rezystor R11 na diodę LED D1. Dioda LED1 błyska więc z częstotliwością, podawaną na wejście B. Natomiast „podzielony” sygnał z nóżki 12 układu U2, po przejściu przez obwód R9, C5, R10 i część kostki U1 podawany jest na rezystor R12 i diodę LED2. Dioda LED 2 błyska więc z częstotliwością 10-krotnie mniejszą niż częstotliwość podawana na punkt B. Diody LED1, LED2 są dołączone do masy przez słuchawki S i uzyskujemy w nich sumę sygnałów o częstotliwości oryginalnej i podzielonej. Podzielenie przez 10 częstotliwości 50 Hz daje wyraźne migotanie diody LED2 i terkot w słuchawkach. Natomiast podzielenie przez 10 częstotliwości pracy przetwornic impulsowych daje w słuchawkach głośny pisk o częstotliwości kilku kiloherców.

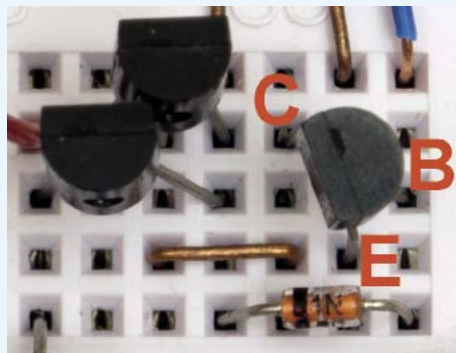
Czujnik pola elektrycznego to pojemnościowy sensor, gdzie antenką jest kawałek izolowanego drutu. Kształt czujnika jest nieistotny – znaczenie ma tylko jego pojemność. Wykorzystujemy prościutki układ z trzema tranzystorami (T4, T5, T6), który jest „odwróconą” wersją czujnika z ćwiczenia wstępnego układu siódmego (porównaj rysunek A z wykładu 7). Czułość tego układu możesz obniżyć, dołączając rezystor R_x – czym mniejsza będzie ta rezystancja, tym mniejsza czułość.

Kluczową kwestią znów jest jak największa oporność wejściowa. Aby zminimalizować wpływ pojemności między elementami płytki stykowej, warto tranzystor T4 zamontować tak, jak pokazuje **fotografia B**.

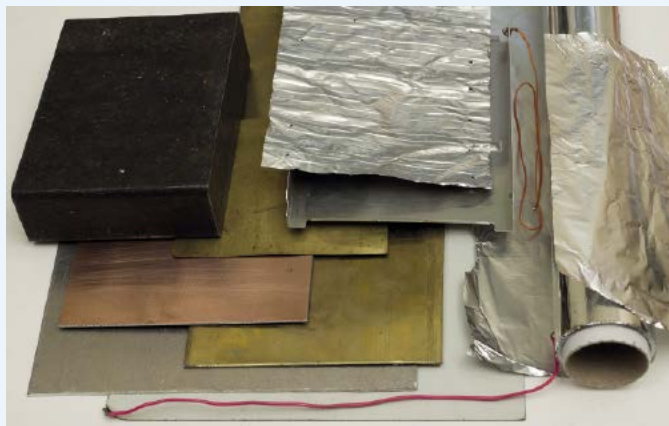
Czujnik pola magnetycznego zawiera pętlę – cewkę oraz tranzystory T1...T3. Od razu widać, że tranzystory T2, T3 tworzą znajomy wzmacniacz, wielokrotnie wykorzystywany we wcześniejszych ćwiczeniach. Jego wzmocnienie napięciowe można łatwo regulować, zmieniając wartość R6 w zakresie od jednego (bez rezystora R6) do kilkuset (minimalna wartość R6 to 22 omy). Wzmacnia on sygnał z kolektora tranzystora T1, występujący na rezystorze R2. Tranzystor T1 pracuje w układzie wspólnej bazy (OB) – jego baza jest dla sygnałów zmiennych zwarta do masy przez kondensator C3 (100 μ F). Zmienny sygnał z jednej końcówki cewki-sondy jest podawany wprost na emiter T1. Druga końcówka cewki-sondy jest dla sygnałów zmiennych zwarta do masy przez kondensator o bardzo dużej pojemności C1 (dodatkowy kondensator C2 1 μ F poprawia właściwości w zakresie wyższych częstotliwości, gdzie duży kondensator elektryczny C1 słabiej sobie radzi). Ten prosty układ z trzema tranzystorami T1...T3 pozwala uzyskać wypadkowe wzmocnienie rzędu kilkudziesięciu tysięcy razy w paśmie przekraczającym 100 kHz.

Ty dociekliwi Czytelnicy zapewne będą się zastanawiać, dlaczego w czujniku pola magnetycznego nie wykorzystaliśmy wzmacniaczy operacyjnych z kostki LM358? Otóż nasza powolna kostka LM358 słabo radzi sobie ze wzmacniaczem sygnałów o większych częstotliwościach.

Na rysunku A i na fotografii tytułowej przedstawione są wartości elementów, które okazały się odpowiednie dla mojej pętli-sondy, która jak poprzednio ma średnicę około 5 cm, a liczba zwojów wynosi 4. Ty do testów możesz też wykorzystać dowolną inną cewkę (dławik), zawierającą wiele zwojów drutu.



B



Rozmieszczenie elementów na płytce stykowej nie jest krytyczne, ale czujnik pola magnetycznego powinien być jak najbardziej zwarty, jak najmniejszy, „kompaktowy”, by jak najmniej „zbierał” zakłóceń elektrycznych.

Uwaga! Podczas testów obowiązkowo zasilaj układ z baterii, a nie z zasilacza!

Najpierw połącz punkty A, B i starannie przebadaj zachowanie naszego wykrywacza zmiennego pola magnetycznego w pobliżu urządzeń elektronicz-

nych i przewodów.

Dzisiaj powszechnie wykorzystuje się zasilacze impulsowe, w których nie ma klasycznego, ciężkiego transformatora sieciowego 50 Hz, tylko jest przetwornica impulsowa z małym transformatorem, a całość pracuje na częstotliwości ponad 20 kHz, a więc niesłyszalnej. Niemniej takie zasilacze impulsowe mogą wytwarzać i zazwyczaj wytwarzają dość silne pole magnetyczne o częstotliwości kilkudziesięciu kiloherców i więcej, które może powodować zakłócenia, interferencje oraz zwiększać szумы. W monitorze naszego wykrywacza pracuje dzielnik częstotliwości przez 10, dzięki któremu możesz bez problemu usłyszeć efekt takich zakłóceń w postaci pisku o częstotliwości kilku kiloherców.

Jeśli tylko masz możliwość, zbadaj pole wokół różnych zasilaczy impulsowych. Przekonasz się, że nie tylko pracują one na różnych częstotliwościach, ale też, że sygnał w słuchawkach niektórych jest niemienny, „gładki”, a w innych jest zmienny, nawet „poszarpany”, co zależy od wykorzystanego rozwiązania układowego przetwornicy.

Przekonaj się, że silne pole magnetyczne występuje w pobliżu klasycznych, ciężkich transformatorów zasilających w starszych urządzeniach. Ma ono częstotliwość sieci (50 Hz) – w słuchawkach usłyszysz brum 50 Hz i terkot 5 Hz. Z takimi częstotliwościami będą migotały diody LED naszego monitora.

Koniecznie zwróć uwagę na fakt, że wielkość sygnału odbieranego przez nasz przyrząd zależy nie tylko od odległości od źródła pola magnetycznego, ale też od kąta ustawienia cewki–sondy. Pole magnetyczne jest kierunkowe. Zmieniaj położenie sondy–cewki w trzech płaszczyznach i przekonaj się, że nawet w pobliżu źródła pola można tak ustawić cewkę–sondę, żeby sygnał był znikomy. Zależy to od kierunku tzw. linii sił pola magnetycznego, o których uczyłeś się na lekcjach fizyki. Możesz też sprawdzić, co zmienia zastosowanie cewki–czujnika o takiej samej liczbie zwojów, ale o różnej wielkości (powierzchni).

Czułość naszego układu możesz regulować w szerokim zakresie, zmieniając wartość R_6 (22 Ω ...10 k Ω).

Sprawdź wielkość pola magnetycznego w pobliżu wszelkich obwodów, w których płynie prąd o wartości zmieniającej się w czasie. Później dla porównania koniecznie przeprowadź analogiczne badania przy połączeniu punktów B, C układu, czyli przy pomocy czujnika – sensora pojemnościowego. Czułość możesz zmniejszyć, włączając rezystor R_x (10 M Ω ...10 k Ω).

Zwróć uwagę, że w przypadku „zakłóceń elektrycznych” kierunek ustawienia i kształt antenki ma znikome znaczenie – jak już wiesz, prawie wszystko zależy od pojemności, a nie od kierunku ustawienia. Najprawdopodobniej wokół zasilaczy impulsowych nie wykryjesz pól elektrycznych o częstotliwościach pracy przetwornicy – to kolejny dowód, że główną przyczyną problemu są napięcia, a konkretnie napięcie sieci 230 V 50 Hz.

A teraz najważniejsza część ćwiczenia wstępnego...

Badanie skuteczności ekranowania, czyli chronienia, osłaniania przed wpływem pól elektrycznego i magnetycznego. Większość elektroników nie ma wiedzy na temat skuteczności ekranowania. Aby ją zdobyć, przygotuj różne ekrany, w tym folię aluminiową (np. do artykułów spożywczych), folię miedzianą (laminat miedziany do płytek drukowanych) oraz kawałki blachy stalowej, aluminiowej, miedzianej lub mosiężnej, najlepiej o różnych grubościach – **fotografia C**. W wersji minimalnej wystarczy folia aluminiowa i blacha stalowa (np. ocynkowana). W roli ekranu możesz też wykorzystać metalowe pudełko czy naczynia, np. garnki aluminiowe, stalowe i żeliwne.

Skuteczność ekranowania zbadaj wstępnie za pomocą tytułowego wykrywacza. Najpierw przy zwarceniu punktów A, B (wykrywacz pól magnetycznych) sprawdź, czy umieszczenie metalowego ekranu pomiędzy źródłem pola magnetycznego, a czujnikiem zmniejszy poziom sygnału?



Na **fotografii D** masz przykład z zasilaczem impulsowym – częstotliwość pola magnetycznego jest duża, kilkadziesiąt kiloherców, i już cieniutka „kuchenna” folia aluminiowa okazuje się skutecznym ekranem. Jeżeli jednak częstotliwość pola wynosi 50 Hz (z klasycznego transformatora), to wszystkie ekrany mają małą skuteczność!

Nawet grube ekrany aluminiowe, miedziane czy mosiężne (**fotografia E**) mają znikomy wpływ, trochę lepsze okazują się stalowe. Jednak do naprawdę skutecznego stłumienia pola magnetycznego 50 Hz potrzebny byłby stałowy ekran o grubości od kilku do kilkunastu milimetrów.

Zwróć też uwagę, że nie ma żadnego znaczenia, czy metalowy ekran podłączysz do masy lub uziemisz.

Zdecydowanie inaczej jest z zakłóceniami przenoszonymi przez pole elektryczne i pojemności. Połącz punkty B, C tytułowego wykrywacza i przeprowadź analogiczne testy.

Co daje umieszczenie metalowego ekranu w pobliżu wykrywacza?

Sprawdź, co zmienia podłączenie ekranu do obwodu masy naszego wykrywacza?

A czy taki sam efekt daje połączenie ekranu do uziemienia (np. do rury wodociągowej, czy ostatecznie do grzejnika)?

Sprawdź ekrany o różnej grubości, z różnego materiału – ich skuteczność okazuje się jednakowa, a wiele zależy od dołączenia do masy czy uziemienia.

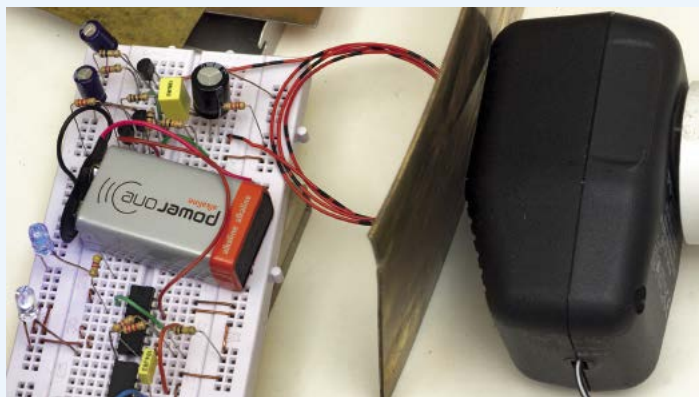
Przekonaj się, że jeżeli umieścisz wykrywacz pola elektrycznego w metalowym ekranie (pudełku), to zupełnie straci on czułość. Także umieszczenie samego czujnika – antenki wykrywacza pól elektrycznych w metalowym pudełku, w ekranie dołączonym do masy, dramatycznie zmniejszy czułość.

Wróć do wykrywacza pola magnetycznego (zwarne punkty A, B) i zaekranuj w nim albo samą pętlę-czujnik, albo cały układ za pomocą jednej warstwy cienkiej folii aluminiowej. Ten foliowy ekran dołącz do masy układu pilnując, by ekran nie spowodował jakiegoś zwarcia w układzie. Mój model podczas takich testów pokazany jest na **fotografii F**. Przekonaj się, że czułość wykrywania pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz praktycznie się nie zmienia. Ekranowanie okazuje się skuteczne względem pola elektrycznego, a bardzo mało daje w przypadku pola magnetycznego o małej częstotliwości (50 Hz).

Nie żałuj czasu na takie eksperymenty z wykrywaczami pola magnetycznego i elektrycznego! W ten sposób zdobędziesz bezcenne doświadczenie!



D



E

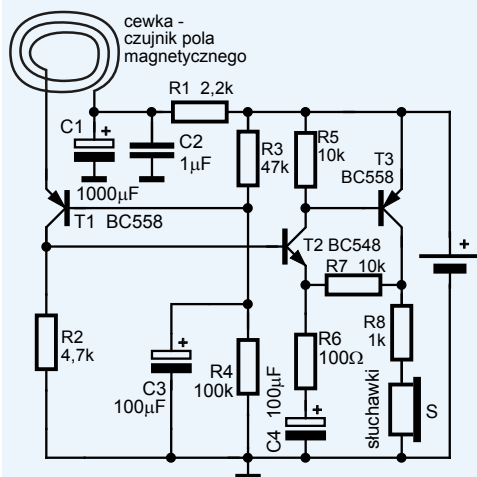


F

Wykład z ćwiczeniami 13

Poznajemy elementy i układy elektroniczne

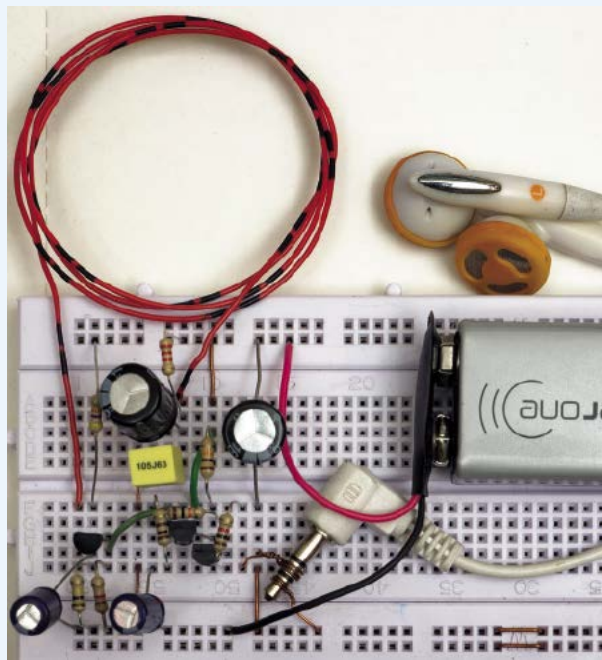
W tym wykładzie badamy bardzo ważny, a tajemniczy problem przenikania zakłóceń przez pole elektryczne i magnetyczne. Najogólniej rzecz biorąc, **pole elektryczne występuje tam, gdzie występują różnice napięć**. Natomiast **pole magnetyczne występuje tam, gdzie płyną prądy**. Przy wysokich częstotliwościach powyżej 100 kHz, pole elektryczne i magnetyczne niejako się łączą, tworząc pole elektromagnetyczne (i fale radiowe), ale przy niższych częstotliwościach pole magnetyczne i elektryczne mają zdecydowanie różne właściwości, dlatego w ćwiczeniu wstępnym wykorzystujemy dwa oddzielne wykrywacze. Podkreśliły te różnice.



wane są przez prądy o bardzo małej wartości, dlatego dają o sobie znać tylko w obwodach, gdzie występują duże oporności. Na takich dużych opornościach te małe prądy potrafią wywołać duże spadki

napięcia, nawet rzędu woltów. Dlatego jednym ze sposobów ich zwalczania jest obniżanie wartości rezystancji układów.

Odwrotnie jest z zakłóceniami przenoszonymi za pomocą **pola magnetycznego**. Każdy przewodnik, w którym płynie prąd, jest źródłem pola magnetycznego – jest w pewnym sensie „nadajnikiem pola magnetycznego”. Zmienne pole magnetyczne powoduje powstanie w każdej pętli (cewce) napięcia. W zamkniętej pętli powoduje przepływ prądu. Generalnie pola zakłócające nie są silne, a powstające napięcia są małe, rzędu mikrowoltów, najwyżej pojedynczych miliwoltów. **Zakłócenia przenoszone przez pole magnetyczne powodują indukowanie się małych napięć, ale mogą one powodować przepływ dużych prądów**, rzędu miliamperów, a nawet amperów, zależnie od rezystancji pętli. Jednym z głównych sposobów walki z takimi zakłóceniami jest usuwanie i minimalizacja wszelkich pętli.



1

2



Badanie pól magnetycznych. Monitor wykrywaczy z rysunku A i fotografii wstępnej reaguje dopiero na stosunkowo silne pola, przekraczające pewną wartość progową. Jeżeli chcesz dokładnie zbadać problem skuteczności ekranowania, powinieneś użyć wykrywaczy, które nie mają działania progowego. Skoncentrujmy się teraz na wykrywaniu pól 50 Hz, do czego wystarczą słuchawki.

Aby wyeliminować progowe działanie monitora możesz zmodyfikować czujnik pola magnetycznego według **rysunku 1** i **fotografii 2**. Zmieniasz tylko wartość R8 i włączasz w szereg z nim słuchawki.

Ultraczuły detektor pola magnetycznego, o dużo lepszych właściwościach, zrealizuj według **rysunku 3**. Możesz dodać kondensator filtrujący zasilanie (1000 μ F). Czułość można regulować w bardzo szerokim zakresie, zmieniając R3 (10 Ω ...2,2 k Ω). Oba wzmacniacze operacyjne pracują w konfiguracji odwracającej, a R1, R2, C2 to obwód sztucznej masy. W moim modelu, pokazanym na **fotografii 4**, zastosowałem sondę-cewkę o większej liczbie zwojów, co jeszcze bardziej zwiększyło czułość.

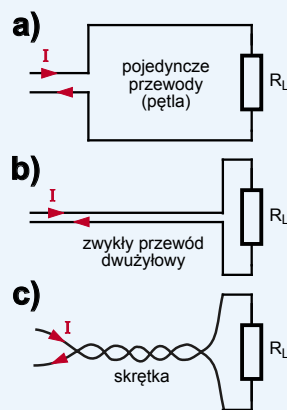
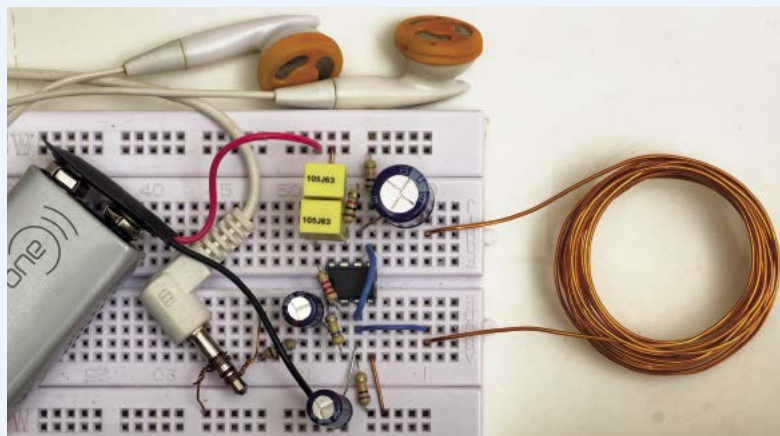
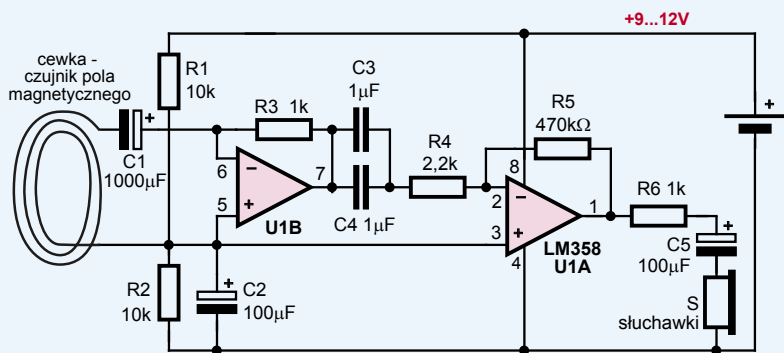
Koniecznym zbuduj taki prościutki układ i przekonaj się, że ma ogromną czułość. Jest natomiast zupełnie niewrażliwy na pole elektryczne z uwagi na małe wartości rezystancji: w pierwszym wzmacniaczu oporność źródła sygnału rezystancja sondy wynosi poniżej 1 oma, a rezystor sprzężenia R3 też ma małą wartość 1 k Ω . Przy tak małych opornościach pole elektryczne powoduje pomijanie małych zakłóceń. Ponieważ rezystancja sondy jest znikoma, wzmacniacz odwracający U1B ma ogromne wzmocnienie, dlatego w słuchawkach cały czas występuje niezmienny, głośny szum – to wzmocnione tysiące razy szumy własne wzmacniacza operacyjnego.

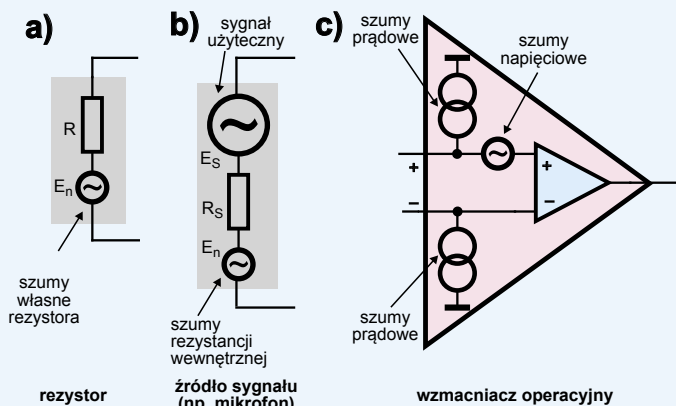
Dobrze byłoby, gdybyś takim czułym detektorem sprawdził wielkość pola magnetycznego w pobliżu przewodów, w których **plynie prąd zmienny** według **rysunku 5** dla trzech przypadków:

- pojedynczego przewodu tworzącego dużą pętlę,
- dla dwóch przewodów umieszczonych obok siebie,
- dla skrętki (samodzielnie zrobionej przez skrócenie dwóch przewodów).

Uwaga! Nie eksperymentuj w obwodach sieci 230 V! Można to zrobić w obwodach żarówek halogenowych 12 V albo prościej (włączając takie przewody między wyjściem wzmacniacza mocy a obciążeniem R_L , którym powinna być żarówka 12 V10 W lub 12 V21 W porównaj rysunki G i H w wykładzie 12).

Nie zapominaj, że pole magnetyczne jest kierunkowe i czułość zależy też od ustawienia cewki-sondy względem kierunku pola. Przekonasz się, że najwięcej „śmieci” pojedynczy drut i pętla, natomiast

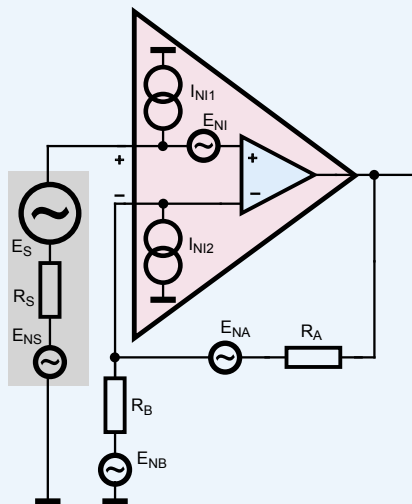




wzycyżna, nieekranowana skrętka praktycznie nie wytwarza żadnych „śmiec magnetycznych”, ponieważ pola wytwarzane przez obie żyły skrętki niemal doskonale się znoszą. A teraz kolejne ważne zagadnienie.

Szumy własne. W związku z ogromnym wzmocnieniem obu stopni układu z rysunku 3, w słuchawkach występuje jednostajny, silny szum. W zasadzie szumy wytwarzają wszystkie elementy elektroniczne. Każdy rezystor (każda

rezystancja), sam z siebie, jest źródłem szumów – wytwarza tzw. szum termiczny. Szumy rezystora można zobrazować jak na **rysunku 6a**. Praktyczne znaczenie mają szumy własne źródła sygnału, co można zilustrować w dużym uproszczeniu jak na **rysunku 6b** oraz szumy pierwszego stopnia wzmacniającego (pary różnicowej we wzmacniaczu operacyjnym). W przypadku wzmacniaczy operacyjnych interesują nas „szumy wejściowe”, które zostaną wzmocnione wraz z sygnałem. We wzmacniaczach operacyjnych sprawa szumów jest na tyle skomplikowana, że oprócz tak zwanych szumów napięciowych mamy do czynienia z dziwnym zjawiskiem szumów prądowych. W katalogach podawana jest gęstość szumów napięciowych, wyrażana w niezrozumiałych, nie tylko dla początkujących, nanowoltach na pierwiastek z herca (porównaj rysunek 10 z wykładu 11) oraz gęstość szumów prądowych, wyrażana w pikoamperach na pierwiastek z herca. Na **rysunku 6c** zaznaczone są te główne źródła szumów wzmacniacza operacyjnego.



Przykładowo, zgodnie z **rysunkiem 7**, w popularnym układzie wzmacniacza nieodwracającego powinniśmy rozpatrywać wejściowe szumy napięciowe wzmacniacza, które są niezmiennie, ale także szumy prądowe, których wkład w całkowity szum jest tym większy, czym większe są współpracujące rezystancje, a do tego szumy własne tych współpracujących rezystancji. Co najważniejsze, „sama z siebie” szumi też rezystancja źródła sygnału R_s – czym jest większa, tym napięcie wytwarzanych szumów jest większe. Wszystkie te szumy są wzmocniane. Ponadto kluczowe znaczenie ma nie tyle sam poziom szumów, co stosunek wielkości sygnału użytecznego do szumów. Jeśli więc chcemy wzmocnić sygnał ze źródła o dużej rezystancji R_s , która to rezystancja sama z siebie wytwarza znaczący szum, to nie ma sensu wykorzystywanie kosztownych wzmacniaczy operacyjnych, które szumią bardzo mało.

Wzmacniacze nazywane ultraniskoszumnymi mają na wejściu tranzystory bipolarne, co daje małą gęstość napięcia szumów, ale dużą gęstość szumów prądowych – są naprawdę niskoszumne tylko przy współpracy ze źródłem sygnału o niskiej rezystancji wewnętrznej, rzędu kilkudziesięciu do kilkuset omów, a i szumiące rezystory ujemnego sprzężenia zwrotnego muszą mieć odpowiednio małą wartość. Choć początkującym trudno to zrozumieć, gdy źródło sygnału ma rezystancję rzędu kiloomów, a tym bardziej megaomów, wtedy z uwagi na „szumy prądowe” takie kosztowne „ultraniskoszumne” wzmacniacze szumią bardziej niż tanie i popularne wzmacniacze operacyjne z tranzystorami polowymi na wejściu.

Zagadnienie jest obszerne i nietławe, ale na razie zapamiętaj tylko, że **każdy wzmacniacz szumi i nieprzekraczalną granicą są szumy ciepłne**. Nasz pocziwy LM358 do niskoszumnym nie należy. W układach audio do powodzeniem wystarczają popularne i tanie, mniej szumiące wzmacniacze NE5532 czy TL072. Jedynie w przedwzmacniaczach mikrofonowych wysokiej jakości bywają wykorzystywane jeszcze mniej szumiące układy. W takich ultraniskoszumnym przedwzmacniaczach mikrofonowych bywają wykorzystywane transformatoriki mikrofonowe, które podwyższając napięcie i zwiększając (transformując) rezystancję źródła, pozwalają obniżyć wypadkowy poziom szumów – **rysunek 8**. W związku

6

7



z wysoką ceną dobrych transformatorów mikrofonowych, częściej stosowane są wzmacniacze o budowie nieco innej niż typowe operacyjne (np. SSM2019, INA217, THAT1510/1512). To jednak odrębne, szerokie i nietłumione zagadnienia. Wróćmy do zakłóceń przenoszonych przez pole elektryczne i pojemności.

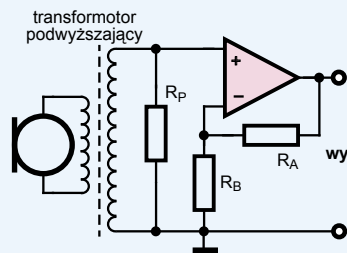
Badanie pól elektrycznych. Możemy powiedzieć, że pole elektryczne ma znikomą wydajność prądową. Dlatego pojemność antenki – sondy powinna być możliwie duża, a wykrywacz pola elektrycznego powinien mieć jak największą oporność wejściową. Ogólnie biorąc, wtórnik ma dużą rezystancję wejściową, jednak w praktyce jest ona znacznie zredukowana przez niezbędny obwód (rezystor) polaryzujący. Dynamiczna rezystancja wejściowa samego wzmacniacza operacyjnego w układzie wtórnika i wzmacniacza nieodwracającego zwykle ma wartość wielu megaomów, ale na wejściu trzeba dodać rezystor polaryzujący R_I według **rysunku 9a** i wtedy rezystancja wejściowa wtórnika/wzmacniacza jest praktycznie równa wartości R_I . Z uwagi na prąd polaryzacji wejścia (patrz wykład 11 rysunek 11b) w wielu wzmacniaczach wartość tej rezystancji R_I nie może być zbyt duża. Można jednak w prosty sposób zwiększyć dynamiczną rezystancję wejściową (dla sygnałów zmiennych). **Rysunek 9b** pokazuje sposób, wykorzystujący technikę zwaną bootstrap (w wolnym tłumaczeniu: podnoszenie siebie samego za sznurówki własnych butów), która polega na swego rodzaju „wspomaganiu” z wykorzystaniem obwodów wyjściowych wzmacniacza. Sygnał z wyjścia X jest podawany przez kondensator C_B na punkt Y – występuje tam przebieg zmienny taki sam, jak przebieg wejściowy. Z obu stron rezystora R_I mamy takie same zmiany napięcia. Czyli na R_I nie ma zmian napięcia, nie ma też zmian prądu, a to oznacza teoretycznie nieskończenie wielką rezystancję dla przebiegów zmiennych. W praktyce dynamiczna rezystancja wejściowa nie jest nieskończenie wielka, ale wielokrotnie większa od wartości R_I . Ten sam sposób, ale z mniejszym skutkiem zwiększania rezystancji wejściowej, można też wykorzystywać we wtórniku tranzystorowym – przykład na **rysunku 10**.

Ultraczuły wykrywacz pola elektrycznego. Nie demolując wykrywacza magnetycznego z rysunku 3, konieczne zbuduj układ według **rysunku 11** i **fotografii 12**. Na początek nie dołączaj antenki-czujnika. Sprawdź dźwięk w słuchawkach. Obwód wejściowy nóżki 5 U1B jest ogromnie czuły i „łapie” nawet znikome zmiany pola elektrycznego. Przekonaj się, że zaekranowanie układu, choćby za pomocą (kuchennej) folii aluminiowej, dołączonej do masy, całkowicie zlikwiduje brum 50 Hz i w słuchawkach będziesz słyszał tylko szumy własne wzmacniacza.

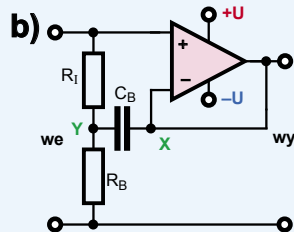
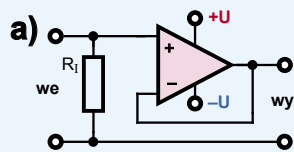
Po takim teście dołącz antenkę A zrobioną z kawałka drutu. Gotowy, zaekranowany wykrywacz (**fotografia 13**) będzie miał ogromną czułość – prawdopodobnie zbyt dużą. Aby ją zmniejszyć, zmniejsz wartość rezystora R4 lub zwiększ wartość R5.

Sprawdź, jak silne są zmienne pola elektryczne w Twoim domu. Gwarantuję Ci, że będziesz zaskoczony wynikami testów. Sprawdź też jeszcze raz skuteczność ekranowania.

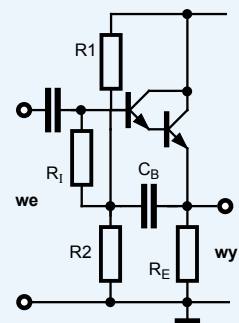
Na koniec możesz jeszcze przekonać się, czy czułe wykrywacze pola magnetycznego i elektrycznego mogą być użyte w roli szukacza kabli w ścianach. Tu jest pewien problem, bowiem mamy tam dwa przewody, w tym jeden neutralny, dołączony do uziemienia. Jego obecność zmniejsza pole elektryczne wytwarzane przez drugi przewód fazowy, na którym występuje napięcie zmienne 230 V 50 Hz, a ponadto pomiar pola elektrycznego może zakłócić



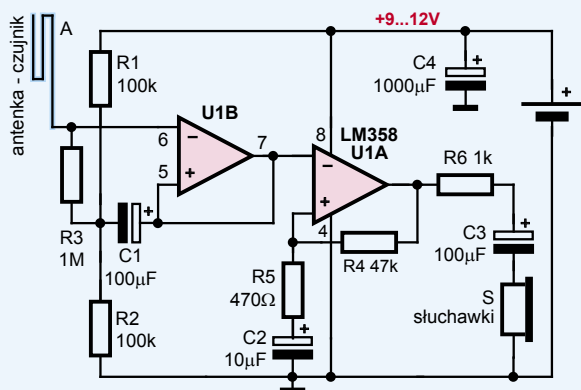
8



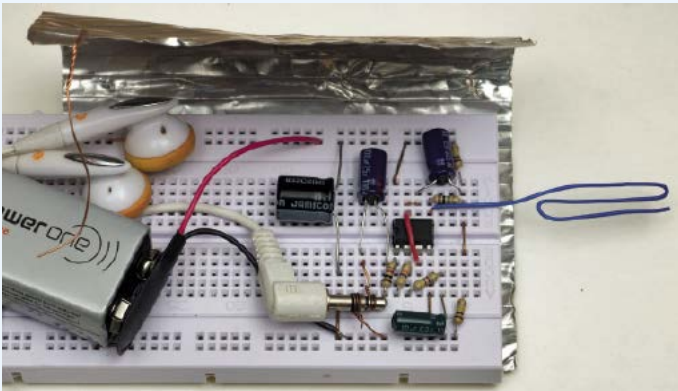
9



10



11



wilgoć zawarta w ścianach. Podobnie pole magnetyczne: w dwóch przewodach ten sam prąd płynie w przeciwnych kierunkach (niejako jednym płynie do obciążenia, drugim „wraca”), przez co pola magnetyczne wytwarzane przez obie żyły w większości się znoszą. Niemniej kabel w ścianie zawsze wytwarza niewielkie pole elektryczne, a jeżeli płynie tam prąd, to także niewielkie pole magnetyczne. Na koniec jeszcze jedna ważna sprawa.

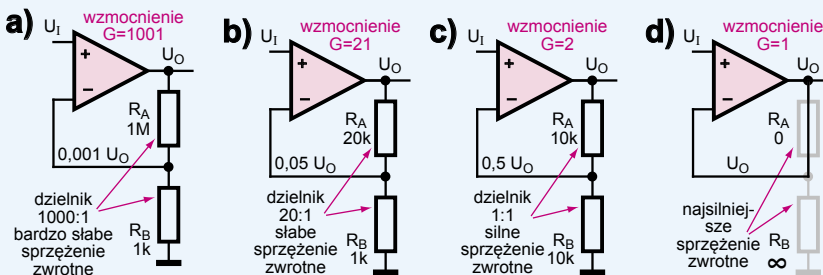
Wzmocnienie i pasmo oraz szybkość. W wielu wzmacniaczach operacyjnych występuje problem jednoczesnego uzyskania i dużego wzmocnienia i szerokiego pasma. Jeśli spróbujesz ustawić duże wzmocnienie wzmacniacza operacyjnego, to przy wyższych częstotliwościach będzie on mieć wzmocnienie dużo niższe od wyznaczonego przez stosunek rezystorów sprzężenia zwrotnego.



Powodem jest wzmacniacz operacyjny. Podstawowa idea jest przecież taka, że realizujemy ujemne sprzężenie zwrotne, czyli część sygnału z wyjścia podajemy na wejście odwracające. Cztery przypadki wzmacniacza nieodwracającego ilustruje **rysunek 14**. Czym silniejsze jest to ujemne sprzężenie, tym bardziej zredukowane jest wzmocnienie. Podkreślam: jest zredukowane. W idealnym wzmacniaczu operacyjnym wzmocnienie powinno być nieskończenie wielkie, a w praktycznym – bardzo duże dla dowolnej częstotliwości. Niestety, tak nie jest.

Pochodzący z katalogu **rysunek 15** pokazuje charakterystykę częstotliwościową „gołego” wzmacniacza LM358 – wzmocnienia „własnego”, zwanego wzmocnieniem z otwartą pętlą sprzężenia (open loop gain). Jak już mówiliśmy wcześniej, jego wzmocnienie jest ogromne i wynosi około 100 dB, czyli 100 tysięcy razy, ale tylko przy prądzie stałym i częstotliwościach poniżej 10 Hz. Wzmocnienie sygnałów o częstotliwościach powyżej 10 herców jest coraz mniejsze i przy „akustycznej” częstotliwości 10 kHz wzmocnienie własne wynosi już tylko około 40 dB czyli 100 razy.

Tymczasem ujemne sprzężenie zwrotne z zasady redukuje wzmocnienie do wartości wyznaczonej przez stosunek rezystorów w obwodzie sprzężenia. Ale jedynie redukuje – nie może wzmocnienia zwiększyć. Dlatego wzmocnienie wypadkowe nie może przekroczyć granic z rysunku 15. W większości wzmacniaczy operacyjnych iloczyn wzmocnienia i szerokości pasma (oznaczany **GBP** – Gain Bandwidth Product) jest stały – jak pokazuje rysunek 10 w wykładzie 11, dla wzmacniacza LM358 GBP wynosi typowo 1,1 MHz, minimalnie 0,7 MHz.



Jak pokazuje niebieska przerywana linia na rysunku 15, wzmacniacz o wzmocnieniu $1000 \times$ (60 dB) z kostką LM358 będzie miał pasmo sięgające tylko do około 1 kHz.



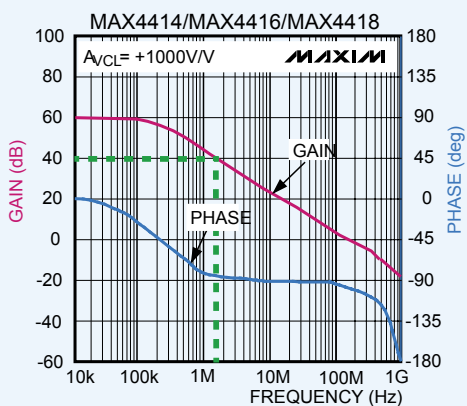
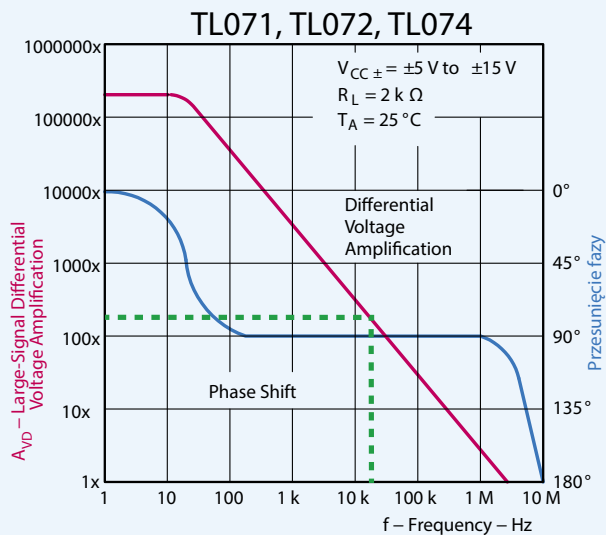
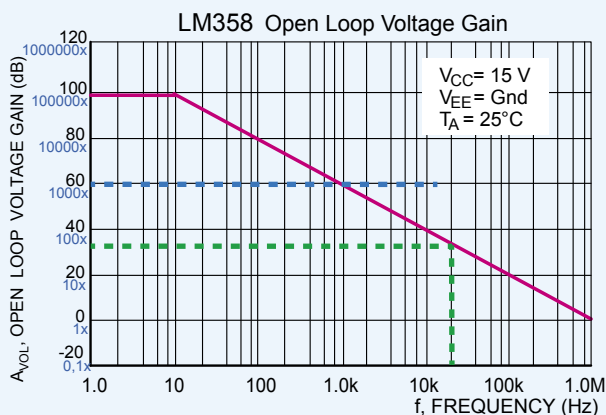
Jeślibyśmy chcieli na kostce LM358 o wartości $GBP=1\text{ MHz}=1000\text{ kHz}$ zrealizować wzmacniacz o pełnym paśmie audio, czyli co najmniej 20 kHz , to wzmocnienie nie mogłoby być większe, niż $50\times$ ($1000\text{ kHz}/20\text{ kHz}$) – na rysunku 15 pokazują to zielone linie. My w tym ćwiczeniu potrzebujemy wzmacniacz sygnały z przetwornic o częstotliwościach do 100 kHz i właśnie dlatego w układzie tytułowym nie wykorzystaliśmy wzmacniacza operacyjnego LM358, bo gdyby nawet wzmocnienie jednego stopnia wyniosło $10\times$ (20 dB), to oba wzmacniacze z kostki LM358 dałyby wzmocnienie wypadkowe $100\times$. My, w prościutkim układzie tytułowym z rysunku A, uzyskaliśmy lepsze właściwości za pomocą trzech tranzystorów. Pomiar wykazał, że już pojedynczy tranzystor T1 zapewnia wzmocnienie napięciowe nieco ponad 100 razy. A wzmacniacz z tranzystorami T2, T3 też pozwala uzyskać wzmocnienie ponad $100\times$ w paśmie ponad 100 kHz , czyli razem ponad 10 tysięcy razy.

Aby uzyskać większe wzmocnienie lub szersze pasmo, należałoby użyć znacznie szybszego wzmacniacza, o większej wartości GBP. Obecnie bez problemu dostępne są wzmacniacze operacyjne nieporównanie szybsze od LM358. Na rysunku 16 pokazana jest analogiczna charakterystyka popularnych wzmacniaczy operacyjnych rodziny TL07x, stosowanych w sprzęcie audio TL072. Jak pokazują zielone linie, możliwe jest uzyskanie wzmocnienia 200 przy pasmie 20 kHz . Podobnie wygląda charakterystyka popularnych wzmacniaczy NE5532, NE5534, stosowanych w układach audio.

Ważnym parametrem jest więc iloczyn wzmocnienia i szerokości pasma GBP, równy częstotliwości granicznej, przy której wzmocnienie spada do jedności.

Drugim, pokrewnym i ważnym parametrem dynamicznym jest szybkość zmian napięcia na wyjściu, oznaczana w katalogach SR (Slew Rate) i wyrażana w woltach na mikrosekundę. Dla LM358 wartość SR wynosi mizernie $0,7\text{ V}/\mu\text{s}$, a dla TL071/072 prawie 20 razy więcej, bo $13\text{ V}/\mu\text{s}$. Wartości SR wzmacniaczy mają związek z wartością GBP, ale nie są to wielkości bezpośrednio powiązane jakąś prostą zależnością.

Zapamiętaj, że w typowych wzmacniaczach operacyjnych nie uda się jednocześnie uzyskać i bardzo dużego wzmocnienia, i szerokiego pasma przeniesienia. Jednak dowolnie duże wzmocnienie przy potrzebnym paśmie przenoszenia uzyskalibyśmy, budując układ z kilkoma wzmacniaczami operacyjnymi lub ze wzmacniaczem bardzo szybkim. W licznych współczesnych zastosowaniach potrzebne są jak najszybsze wzmacniacze, pracujące przy częstotliwościach rzędu wielu megaherców. Niektóre wyspecjalizowane w tym kierunku wzmacniacze operacyjne



15

16

17

1GHz, 5500 V/ μ s Low Distortion Amplifier Ultrahigh Speed

5500 V/ μ s Slew Rate, 4 V Step, G = +2

545 ps Rise Time, 2 V Step, G = +2

Small Signal Bandwidth (-3 dB)

1GHz, G = +1

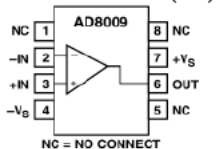
700MHz, G = +2

Large Signal Bandwidth

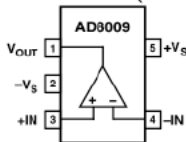
440MHz, G = +2

320MHz, G = +10

8-Lead Plastic SOIC (R-8)



5-Lead SOT-23 (RT-5)



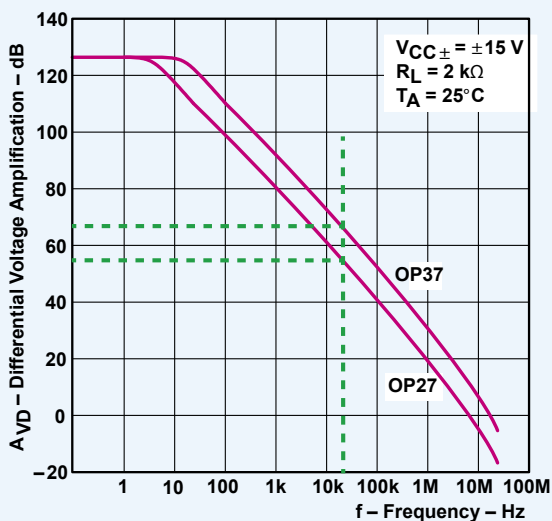
The AD8009 is an ultrahigh speed current feedback amplifier with a phenomenal 5,500 V/ μ s slew rate that results in a rise

18

time of only 545 ps. It is not only the slew rate, but also the gain-bandwidth product (GBP) of 1 GHz, which makes the AD8009 a very fast amplifier. Practical use of such fast amplifiers requires more knowledge and experience.

At the end, it is worth mentioning that most operational amplifiers are factory "compensated" by an internal compensation capacitor (visible in figures 6 and 7 in figure 9), which reduces the bandwidth of the frequency response and also the SR. Identical amplifiers without an internal compensation capacitor are much faster, but they can only be used in circuits with a gain of more than 3x or 5x, depending on the type. In the first popular operational amplifier uA709, such a compensation capacitor was connected from the outside, and today it is produced in a compensated version and is much faster than uncompensated versions, to replace only LF356 and LF357 or high-quality OP27 and OP37. **Figure 19** shows the comparison of "high-speed" amplifiers OP27 and OP37. The difference is large. The OP37 (GBP=63 MHz, SR=17 V/ μ s) looks much better, but in practice it is easier to use and much more popular is the compensated OP27 (GBP=8 MHz, SR=2.8 V/ μ s).

An operational amplifier without a compensation capacitor is faster, but it cannot work as a buffer or at a gain of 1, because it would oscillate. A detailed explanation of the causes of such a phenomenon would be too complicated. In general, it can be said that in individual stages of the amplifier, the lack of compensation leads to different time constants, which causes a delay in the signal and a phase shift. This delay causes, at a certain high frequency, the feedback to become positive, and then oscillation occurs. Most of all, it concerns circuits where, with the help of feedback, we want to achieve a high gain (for example, see figure 14) and it is precisely then, when the signal is delayed, that oscillation occurs, or rather, the amplifier becomes a generator. To solve the problem, an internal compensation capacitor is used to limit the bandwidth and reduce the gain at the highest frequencies, which prevents self-oscillation even at high gain, or rather, at high feedback.



19

time of only 545 ps. It is not only the slew rate, but also the gain-bandwidth product (GBP) of 1 GHz, which makes the AD8009 a very fast amplifier. Practical use of such fast amplifiers requires more knowledge and experience.

At the end, it is worth mentioning that most operational amplifiers are factory "compensated" by an internal compensation capacitor (visible in figures 6 and 7 in figure 9), which reduces the bandwidth of the frequency response and also the SR. Identical amplifiers without an internal compensation capacitor are much faster, but they can only be used in circuits with a gain of more than 3x or 5x, depending on the type. In the first popular operational amplifier uA709, such a compensation capacitor was connected from the outside, and today it is produced in a compensated version and is much faster than uncompensated versions, to replace only LF356 and LF357 or high-quality OP27 and OP37. **Figure 19** shows the comparison of "high-speed" amplifiers OP27 and OP37. The difference is large. The OP37 (GBP=63 MHz, SR=17 V/ μ s) looks much better, but in practice it is easier to use and much more popular is the compensated OP27 (GBP=8 MHz, SR=2.8 V/ μ s).

An operational amplifier without a compensation capacitor is faster, but it cannot work as a buffer or at a gain of 1, because it would oscillate. A detailed explanation of the causes of such a phenomenon would be too complicated. In general, it can be said that in individual stages of the amplifier, the lack of compensation leads to different time constants, which causes a delay in the signal and a phase shift. This delay causes, at a certain high frequency, the feedback to become positive, and then oscillation occurs. Most of all, it concerns circuits where, with the help of feedback, we want to achieve a high gain (for example, see figure 14) and it is precisely then, when the signal is delayed, that oscillation occurs, or rather, the amplifier becomes a generator. To solve the problem, an internal compensation capacitor is used to limit the bandwidth and reduce the gain at the highest frequencies, which prevents self-oscillation even at high gain, or rather, at high feedback.

In the next lecture, we will continue to use operational amplifiers. ■

Piotr Górecki