

PKE – Praktyczny Kurs Elektroniki

Wykład 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 ten temat 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.

Na fotografii wstępnej masz rozbudowaną wersję wykrywacza pól magnetycznych i elektrycznych. Z lewej strony płytki zmontowany jest czujnik zmiennych pól magnetycznych z kilkuswojową pętlą – cewką. Z prawej strony płytki zmontowany 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.

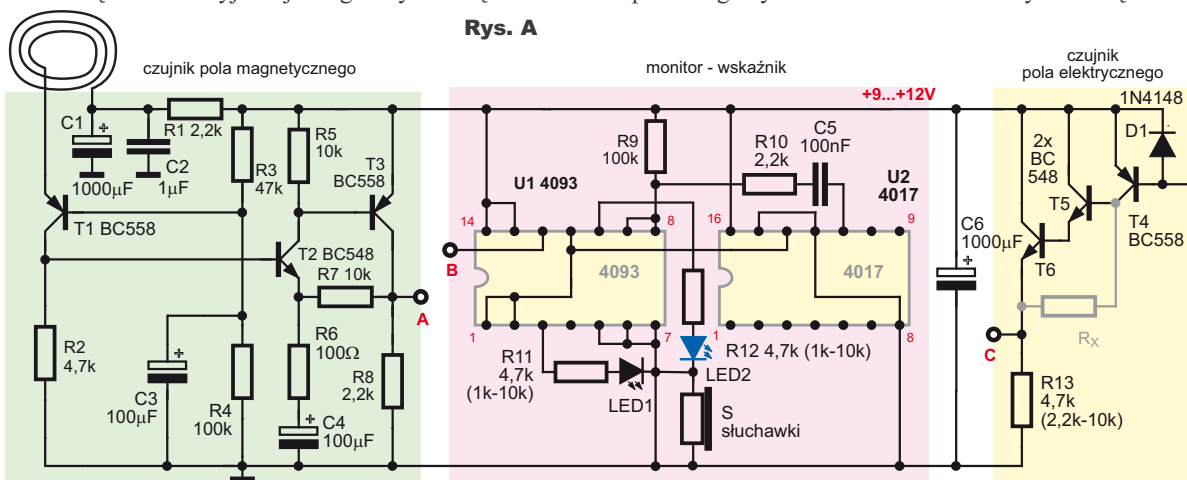
Opis układu dla „zaawansowanych”

Nasz podwójny wykrywacz zrealizowany według rysunku A zawiera trzy bloki: *czujnik pola magnetycznego* (zielona podkładka), *czujnik pola elektrycznego* (żółta 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

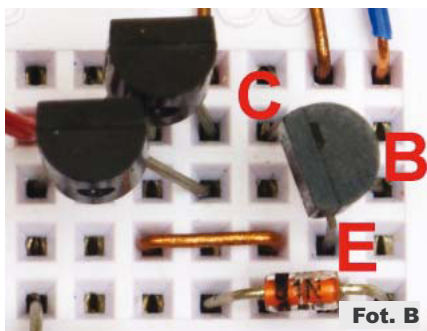
nowoczesnych urządzeń z zasilaczami (przetwornicami) impulsowymi, to ich częstotliwości pracy są rzędu kilkudziesięciu kiloherców, a nawet ponad 100kHz, a więc są niesłyszalne dla ucha. Aby wykryć takie szybkozmiennne pola, dodany jest dzielnik częstotliwości.

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,



Rys. A

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



ska 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 50Hz 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 wykładu 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 wzmacnienie napięciowe można łatwo regulować, zmieniając wartość R_6 w zakresie od 1 (bez rezystora R_6) do kilkuset (minimalna wartość R_6 to 22 omy). Wzmacnia on sygnał z kolektora tranzystora T1, występujący na rezystorze R_2 . Tranzystor T1 pracuje w układzie wspólnej bazy (OB) – jego baza jest dla sygnałów zmiennych zwarta do masy przez kondensator C3 (100uF). 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 (dodatkiowy kondensator C2 1uF poprawia właściwości w zakresie wyższych

częstotliwości, gdzie duży kondensator elektrolityczny C1 słabiej sobie radzi). Ten prosty układ z trzema tranzystorami T1...T3 pozwala uzyskać wypadkowe wzmacnienie rzędu kilkudziesięciu tysięcy razy w paśmie przekraczającym 100kHz.

Tu 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 wzmacnianiem 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 5cm, a liczba zwojów wynosi 4. Ty do testów możesz też wykorzystać dowolną inną cewkę (dławik), zawierającą wiele zwojów drutu.

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

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 elektronicznych i przewodów.

Dziś powszechnie wykorzystuje się zasilacze impulsowe, w których nie ma klasycznego, ciężkiego transformatora sieciowego 50Hz, tylko jest przetwornica impulsowa z małym transformatorem, a całość pracuje na częstotliwości ponad 20kHz, 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 niektórych sygnał w słuchawkach jest niezmienny, „gładki”, a 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 (50Hz) – w słuchawkach usłyszysz brum 50 Hz i terkot 5Hz. 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 (22Ω ... 10kΩ).

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 za pomocą czujnika – sensora pojemnościowego. Czułość możesz zmniejszyć, włączając rezystor R_X (10MΩ ... 10kΩ).

Zwróć uwagę, że w przypadku „zakłóceń elektrycznych” kierunek ustawienia i kształt antenki mają 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 230V 50Hz.

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 pudełka czy naczynia, np. garnki aluminiowe, stalowe i żeliwne.

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

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 50Hz (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 tłumienia pola *magnetycznego* 50Hz potrzebny byłby stalowy 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.

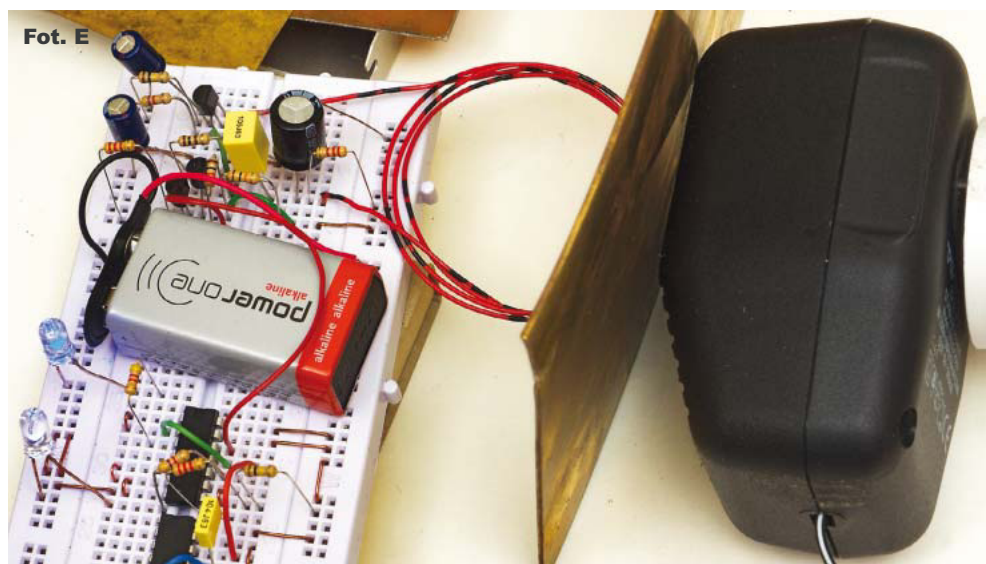
Wróć do wykrywacza pola magnetycznego (zwarte punkty A, B) i zaskranuj w nim albo samą pętlę – czujnik, albo cały układ za pomocą jednej warstwy cienkiej folii aluminiowej. Ten foliowy ekran dołącz do masy układu, pilnując, by ekran nie spowodował jakiegoś zwarcia w układzie. Mój model podczas takich testów pokazany jest na **fotografii F**. Przekonaj się, że czułość wykrywania pola magne-



Fot. C



Fot. D



Fot. E

tycznego o częstotliwości 50Hz praktycznie nie zmienia się. Ekranowanie okazuje się skuteczne względem pola elektrycznego, a bardzo mało daje w przypadku pola magnetycznego o małej częstotliwości (50Hz).

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

Poznajemy elementy i układy elektroniczne

W tym wykładzie badamy bardzo ważny, a tajemniczy problem przenikania zakłóceń przez pole elektryczne i magnetyczne. Najogólniej biorąc, *pole elektryczne występuje tam, gdzie występują różnice napięć*, natomiast *pole magnetyczne występuje tam, gdzie płyną prądy*. Przy wysokich częstotliwościach, powyżej 100kHz, 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.

Otóż między dwoma dowolnymi przewodzącymi przedmiotami, rozdzielonymi warstwą izolatora (np. powietrza), występuje jakaś niewielka pojemność. A gdy przedmioty mają niejednakowe potencjały elektryczne, to w dielektryku (w powietrzu) występuje pole elektryczne. Gdy napięcie zmienia się, przez pojemności płyną prądy. Zakłócenia przedostające się przez pole elektryczne najprościej i najbardziej obrazowo można wyjaśnić, uświadamiając sobie obecność mnóstwa pasożytniczych pojemności „wszystkiego za wszystkim”. W praktyce głównym źródłem tych zakłóceń jest napięcie sieci 230V 50Hz, a niepożądane pojemności są bardzo małe, zwykle poniżej 1 pikofarada, więc ich reaktancja (X_C) jest bardzo duża,



Fot. F

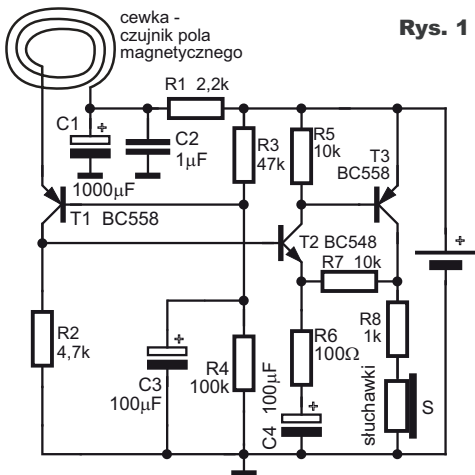
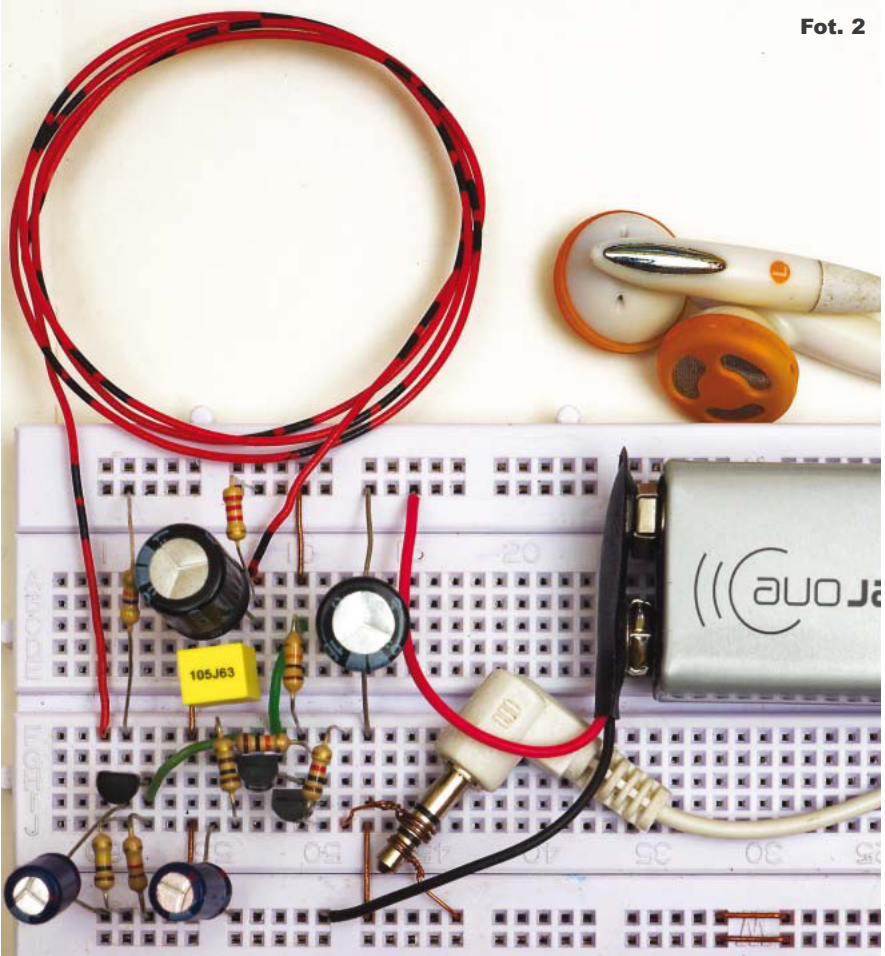
rzędzie wielu megaomów. Dlatego płynące prądy mają znikomą wartość, poniżej 1 mikroampera.

Podsumujmy: *zakłócenia przenoszone przez pole elektryczne (i wszechobecne pojemności) powodowane 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

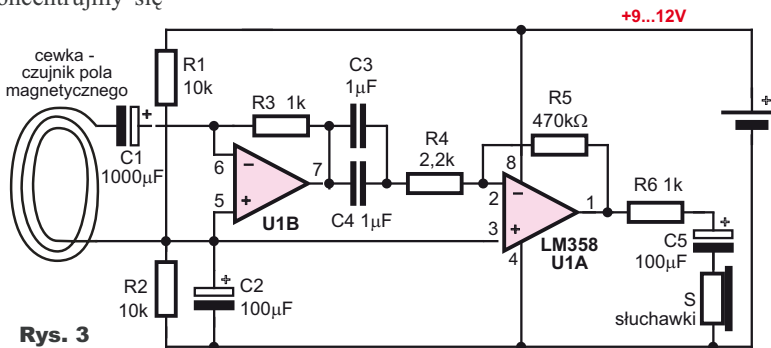
Fot. 2



powoduje przepływ prądu. Generalnie pola zakłócające nie są silne, a powstające napięcia są małe, rzędu mikrowoltów, powyżej 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.

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

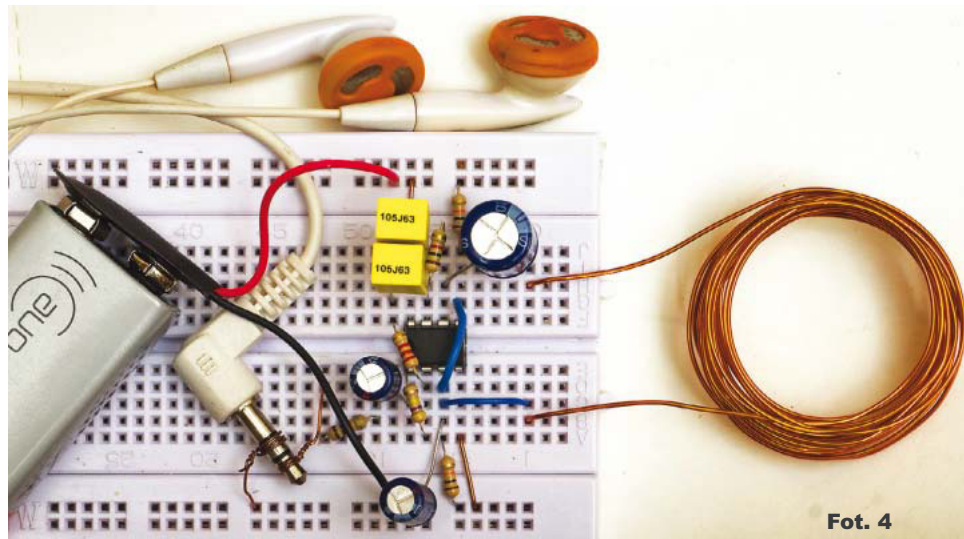


Rys. 3

Ultra czuły detektor

pola magnetycznego o dużo lepszych właściwościach zrealizuj według **rysunku 3**. Możesz dodać kondensator filtrujący zasilanie (1000uF). Czułość można regulować w bardzo szerokim zakresie, zmieniając R3 (10Ω...2,2kΩ). Oba wzmacniacze operacyjne pracują w konfiguracji odwracającej, a R1, R2, C2 to obwód szucznej 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, czyli rezystancja sondy wynosi poniżej 1 oma, a rezystor sprzężenia R3 też ma małą wartość 1kΩ. Przy tak małych opornościach pole elektryczne powoduje pomijalnie małe zakłócenia. Rezystancja sondy jest znikoma, wzmacniacz odwracający U1B ma ogromne wzmocnienie, w słuchawkach cały czas występuje niezmienny, głośny szum – wzmocnione tysiące razy szumy własne wzmacniacza operacyjnego.



Fot. 4

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

- a – pojedynczego przewodu tworzącego dużą pętlę,
- b – dla dwóch przewodów umieszczonych obok siebie,
- c – dla skrętki (samodzielnie zrobionej rzez skręcenie dwóch przewodów).

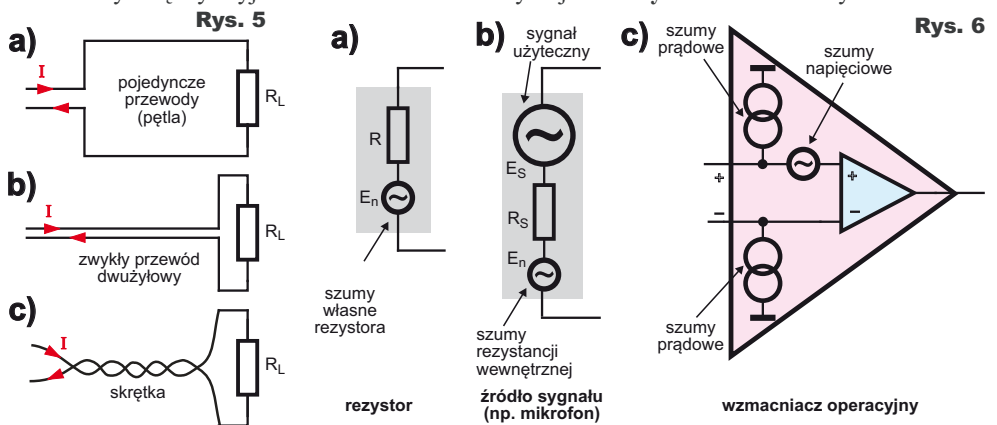
Uwaga! Nie eksperymentuj w obwodach sieci 230V! Możesz to zrobić w obwodach żarówek halogenowych 12V albo prościej, włączając takie przewody między wyjściem wzmacniacza mocy

a obciążeniem R_L, którym powinna być żarówka 12V10W lub 12V21W – porównaj rysunki G i H w wykładzie 12.

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

czajna, nieekranowana skrętka praktycznie nie wytwarza żadnych „śmieci 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 znacze-

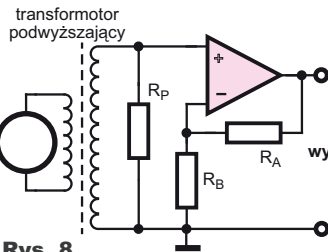


Rys. 6

nie 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 *nanovoltach 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 wzmacniane. Ponadto kluczowe znaczenie ma nie tyle sam poziom szumów, tylko 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 bipolarnie, 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,

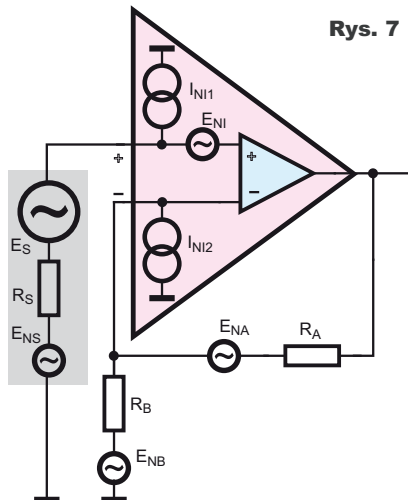


Rys. 8

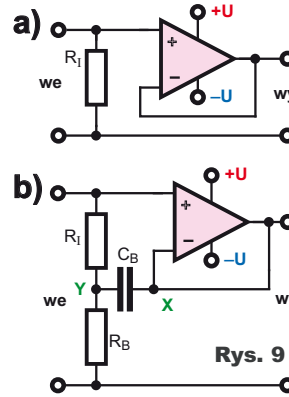
wtedy z uwagi na „szumy prądowe” takie kosztowne „ultraniskoszumne” wzmacniacze szumią bardziej niż tanie i popularne wzmacniacze operacyjne z tranzystorami polowymi na wejściu.

Zagadnienie jest obszerne i niełatwe, ale na razie zapamiętaj tylko, że **każdy wzmacniacz szumi i nieprzekraczalną granicą są szumy ciepłne**. Nasz poczciwy LM358 do niskoszumnym nie należy. W układach audio z 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 z wysoką ceną dobrych transformatorików mikrofonowych, częściej stosowane są wzmacniacze o budowie nieco innej, niż typowe operacyjne (np. SSM2019, INA217, THAT1510/1512). To jednak odrębne, szerokie i niełatwe zagadnienia. Wróćmy do zakłóceń przenoszonych przez pole elektryczne i pojemności.

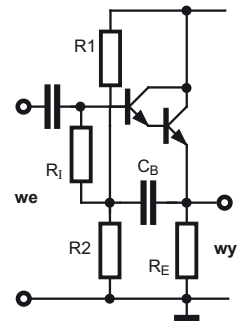
Badanie pól elektrycznych. Możemy powiedzieć, że „pole elektryczne ma znikomą wydajność prądową”. Dlatego pojemność antenki – sondy powinna być możliwie duża,



Rys. 7



Rys. 9

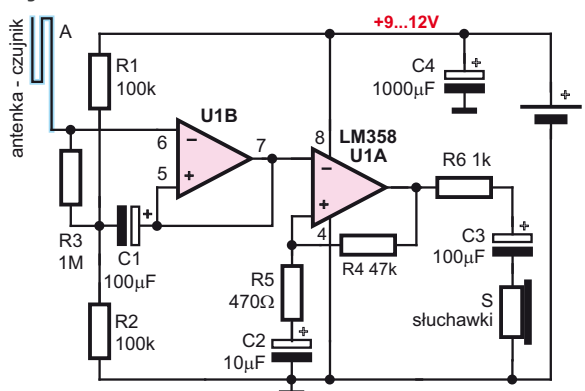


Rys. 10

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 wtórnik i wzmacniacza nieodwracającego zwykle ma wartość wielu megaomów, ale na wejściu trzeba dodać rezystor polaryzujący R_1 według **rysunku 9a** i wtedy rezystancja wejściowa wtórnik/wzmacniacza jest praktycznie równa wartości R_1 . Z uwagi na prąd polaryzacji wejścia (patrz wykład 11 rysunek 11b) w wielu wzmacniaczach wartość tej rezystancji R_1 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_1 mamy takie same zmiany napięcia. Czyli na R_1 nie ma zmian napięcia, nie ma też zmian prądu, a to oznacza teoretycznie nieskończenie wielką

Rys. 11



rezystancję dla przebiegów zmiennych. W praktyce dynamiczna rezystancja wejściowa nie jest nieskończenie wielka, ale wielokrotnie większa od wartości R_1 . Ten sam sposób, ale z mniejszym skutkiem zwiększania rezystancji wejściowej, można też wykorzystać we wtórniku tranzystorowym – przykład na rysunku 10.

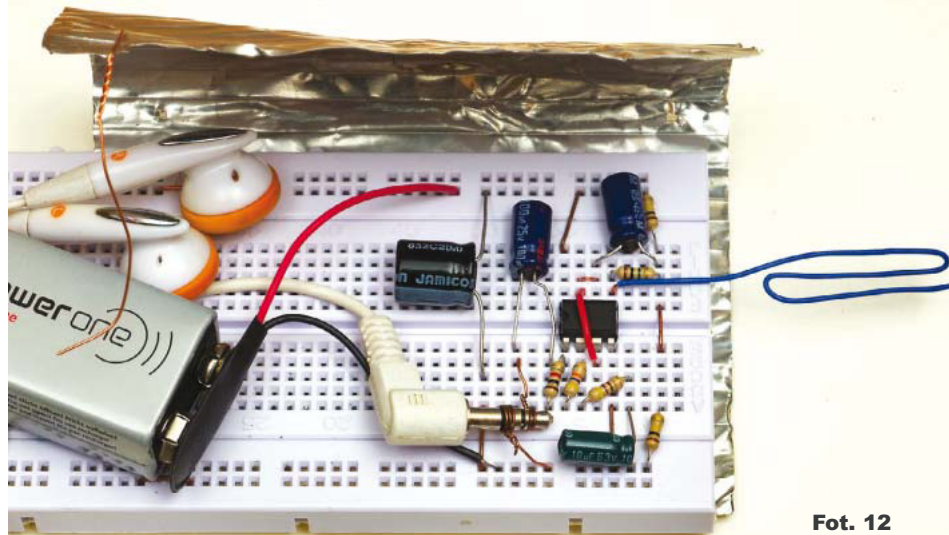
Ultraczuły wykrywacz pola elektrycznego. Nie demolując wykrywacza magnetycznego z rysunku 3, konieczne zbuduj układ według rysunku 11 i fotografii 12. Na początek nie dołączaj antenki – czujnika. Sprawdź dźwięk w słuchawkach. Obwód wejściowy nożki 5 U1B jest ogromnie czuły i „łapie” nawet znikome zmiany pola elektrycznego. Przekonaj się, że zaekranowanie układu, choćby za pomocą (kuchennej) folii aluminiowej, dołączonej do masy, całkowicie zlikwiduje brum 50Hz 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 R_4 lub zwiększ wartość R_5 .

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 230V 50Hz, a ponadto pomiar pola elektrycznego może zakłócić 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.

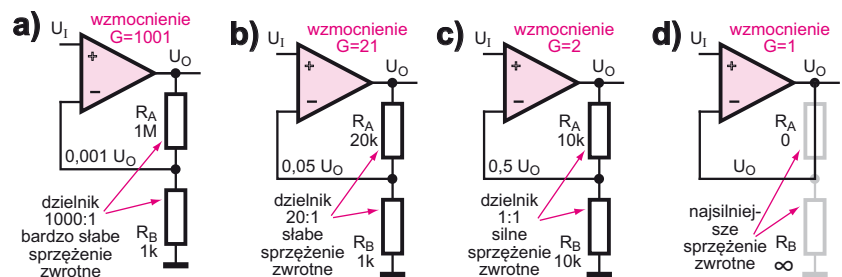
Wzmocnienie i pasmo oraz szybkość. W wielu wzmacniaczach operacyjnych występuje problem jednoczesnego uzyskania i dużego wzmocnienia, i szerokiego pasma. Jeśli spróbujesz ustawić duże wzmocnienie wzmacniacza operacyjnego,



Fot. 12



Fot. 13



Rys. 14

go, 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 redukowane jest wzmocnienie. Podkreślam: jest *redukowane*. 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 100dB, czyli 100 tysięcy razy, ale tylko przy prądzie stałym i częstotliwościach poniżej 10Hz. Wzmocnienie sygnałów o częstotliwościach powyżej 10 herców jest coraz mniejsze i przy „akustycznej” częstotliwości 10kHz wzmocnienie własne wynosi już tylko około 40dB czyli 100 razy.

Tymczasem ujemne sprzężenie zwrotne z zasady *redukuje* wzmocnienie do wartości wyznaczonej przez stosunek

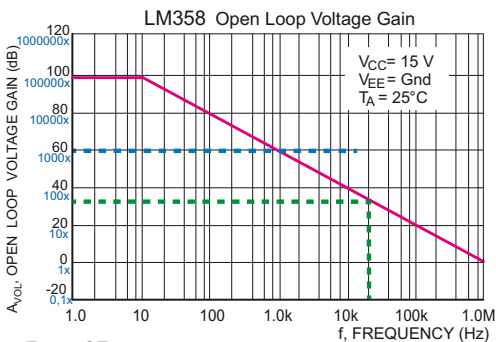
rezystorów w obwodzie sprzężenia. Ale jedynie *redukuje* – nie może wzmocnienia zwiększyć. Dlatego wzmocnienie wypadkowe nie może przekroczyć granic z rysunku 15. W większości wzmacniaczy operacyjnych iloczyn wzmocnienia i szerokości pasma (oznaczany **GBP** – *Gain Bandwidth Product*) jest stały – jak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

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

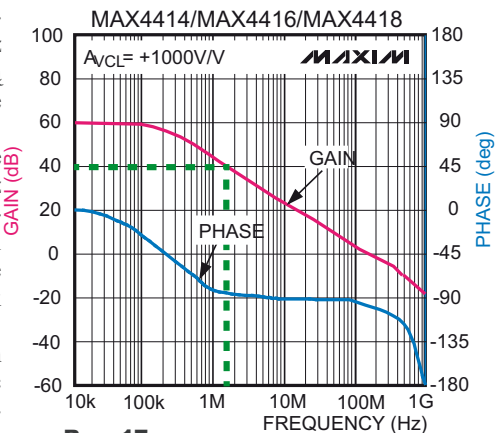
Jeśli byśmy chcieli na kostce LM358 o wartości $GBP = 1\text{MHz}$ = 1000kHz zrealizować wzmacniacz o pełnym paśmie audio, czyli co najmniej 20kHz, to wzmocnienie nie mogłoby być większe, niż 50x (1000kHz/20kHz) – na rysunku 15 pokazują to zielone linie. My w tym ćwiczeniu potrzebujemy wzmacniać sygnały z przetwornic o częstotliwościach do 100kHz i właśnie dlatego w układzie tytułowym nie wykorzystaliśmy wzmacniacza operacyjnego LM358, bo gdyby nawet wzmocnienie jednego stopnia wyniosło 10x (20dB), to oba wzmacniacze z kostki LM358 dałyby wzmocnienie wypadkowe 100x. My w prościutkim układzie tytułowym z rysunku A lepsze właściwości uzyskaliśmy 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 100x w pasmie ponad 100kHz, 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 20kHz. 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.



Rys. 15

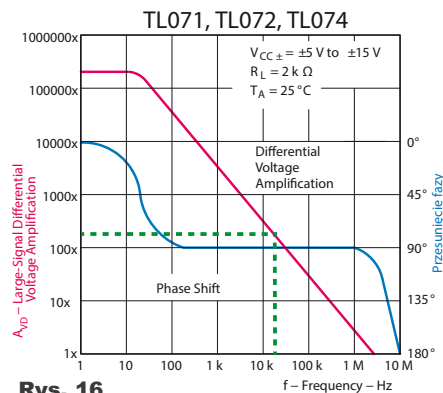


Rys. 17

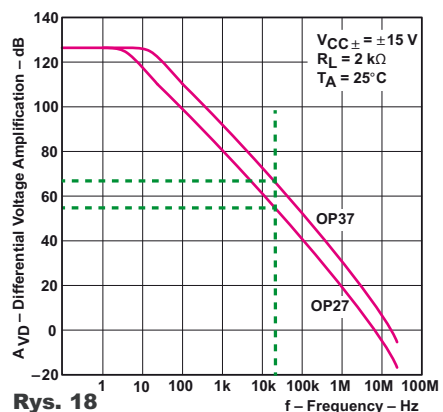
Drugim, pokrewnym i ważnym parametrem dynamicznym jest szybkość zmian napięcia na wyjściu, oznaczana w katalogach SR (*Slew Rate*) i wyrażana w voltach na mikrosekundę. Dla LM358 wartość SR wynosi mizerne 0,7V/us, a dla TL071/072 prawie 20 razy więcej, bo 13V/us. Wartości SR wzmacniaczy mają związek z wartością GBP, ale nie są wielkościami bezpośrednio powiązane jakąś prostą zależnością.

Zapamiętaj, że **w typowych wzmacniaczach operacyjnych nie uda się jednocześnie uzyskać i bardzo dużego wzmocnienia, i szerokiego pasma przenoszenia**. Jednak dowolnie duże wzmocnienie przy potrzebnym pasmie 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 specjalizowane w tym kierunku wzmacniacze operacyjne mają iloczyn GBP rzędu wielu megaherców, jak na przykład Maxim MAX4414. Jak pokazuje **rysunek 17**, wzmocnienie maksymalne jest mniejsze (60dB = 1000x), ale za to przy wzmocnieniu równym 100x pasmo przenoszenia sięgnie około 1,5MHz.

Warto też wspomnieć, że w dążeniu do zwiększania szybkości, opracowano wzmacniacze pracujące według odmien-



Rys. 16



Rys. 18

nej koncepcji – tak zwane CFA (*Current Feedback Amplifier*), czyli wzmacniacze ze sprzężeniem prądowym. Mają inną budowę wewnętrzną, niż klasyczne wzmacniacze operacyjne (nazywane VFA – *Voltage Feedback Amplifiers* – wzmacniaczami ze sprzężeniem napięciowym). Schemat aplikacyjny i wzory na wzmocnienie wzmacniacza nieodwracającego CFA są identyczne jak klasycznych VFA, jednak duże znaczenie ma nie tylko stosunek, ale też wartości rezystorów sprzężenia zwrotnego. **Rysunek 18** pokazuje, że wzmacniacz Analog Devices AD8009 ma $GBP = 1\text{GHz}$, a $SR = 5500$ voltów na mikrosekundę. Praktyczne wykorzystanie szybkich wzmacniaczy CFA wymaga dużej wiedzy i doświadczenia.

Na koniec warto wspomnieć o tym, że większość wzmacniaczy operacyjnych jest fabrycznie „spowolniona” przez wbudowany wewnątrz kondensator kompensacyjny (widoczny na rysunkach 6 i 7 w wykładzie 9), który zmniejsza pasmo przenoszonych częstotliwości i zmniejsza też SR. Identyczny wzmacniacz bez wewnętrznego kondensatora kompensującego jest dużo szybszy, ale może pracować jedynie w układach o wzmocnieniu większym niż 3x lub 5x, zależnie od typu. W pierwszym naprawdę popularnym wzmacniaczu operacyjnym uA709 taki kondensator kompensujący był dołączony z zewnątrz, a do dziś produkuje się

blizniacze wzmacniacze w wersji skompensowanej i dużo szybsze nieskompensowane, żeby wymienić jedynie LF356 i LF357 czy wysokiej jakości OP27 i OP37. Rysunek 19 pokazuje porównanie „parametrów szybkościowych” wzmacniaczy OP27 i OP37. Różnica jest duża. Wzmacniacz OP37 (GBP = 63MHz, SR = 17V/us) wygląda na dużo lepszy, jednak w praktyce łatwiejszy do stosowania i znacznie popularniejszy jest skompensowany OP27 (GBP = 8MHz, SR = 2, 8V/us).

Wzmacniacz operacyjny bez kondensatora kompensującego jest szybszy, ale nie mógłby pracować ani jako wtórnik, ani przy małym wzmacnieniu bliskim jedności, ponieważ nastąpiłoby samowzbudzenie. Szczegółowe wyjaśnienie przyczyn takiego na pozór dziwnego zjawiska byłoby zbyt skomplikowane. W ogromnym uproszczeniu można to widzieć tak: w poszczególnych stopniach wzmacniacza wskutek konieczności przeładowania różnych pasożytniczych pojemności następuje niewielkie opóźnienie



AD8009

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

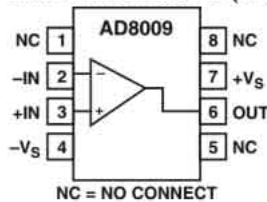
700MHz, G = +2

Large Signal Bandwidth

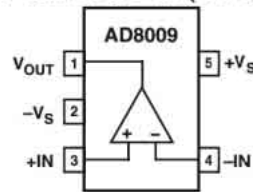
440MHz, G = +2

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

signal and phase shift.

To opóźnienie powoduje, że przy pewnej wysokiej częstotliwości sprzężenie zwrotne z ujemnego staje się dodatnie, a wtedy następuje samowzbudzenie. Najbardziej dotyczy to układów, gdzie za pomocą sprzężenia zwrotnego chcemy uzyskać małe wzmac-

zenie wypadkowe (przy czym oczywiście „wzmocnienie własne” wzmacniacza pozostaje duże). Wtedy duża część sygnału z wyjścia jest przekazywana na wejście odwracające (porównaj rysunek 14) i właśnie wtedy duży przesunięty, opóźniony sygnał powoduje samowzbudzenie, czyli zamianę wzmacniacza w generator.

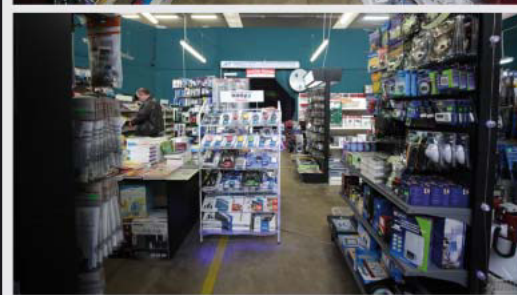
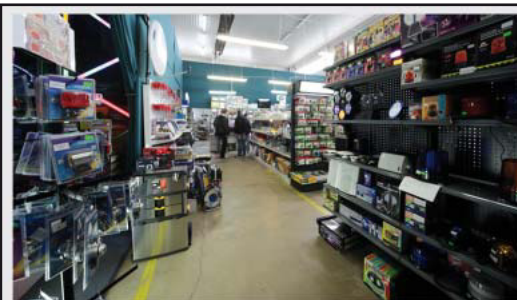
Aby usunąć problem, wewnętrzny kondensator kompensujący obcina pasmo i zmniejsza wzmacnienie najwyższych częstotliwości, co zapobiega samowzbudzeniu także przy małym wzmacnieniu wypadkowym, czyli przy silnym sprzężeniu zwrotnym.

W następnym wykładzie nadal będziemy wykorzystywać wzmacniacze operacyjne.

Rys. 19

Piotr Górecki

R E K L A M A



Sklep nie tylko dla elektroników...

- zestawy AVT do samodzielnego montażu
- zestawy uruchomieniowe, gotowe moduły
- programatory
- części i podzespoły elektroniczne
- zasilacze, przetwornice
- ładowarki, akumulatory
- mierniki, oscyloskopy, generatory
- lutownice i akcesoria lutownicze
- walizki narzędziowe, organizery
- megafony, nagłośnienie PA
- oświetlenie LED
- narzędzia
- chemia
- książki
- akcesoria RTV, komputerowe i samochodowe
- sprzęt dyskotekowy
- oraz wiele innych...



Zapraszamy



AVT-Korporacja Sp. z o.o.,
03-197 Warszawa, ul. Leszczyńska 11
Dział Handlowy tel.: (22) 257 84 50 handlowy@avt.pl
www.sklep.avt.pl