

Multiodbiornik ELF-VLF

Opisane w artykule proste układy umożliwiają odbiór i analizę tajemniczych sygnałów radiowych ELF-VLF. Układy te mogą być wykonane przez początkujących elektroników i w przeciwieństwie do typowych układów w.cz., nie wymagają nawijania cewek.



część 1

Opisany odbiornik, a właściwie zestaw odbiorników, umożliwia odbiór tajemniczych sygnałów radiowych o skrajnie niskich częstotliwościach. Możliwa jest obserwacja sygnałów komunikacji z okrętami podwodnymi oraz tzw. rezonansu Schumann'a.

Możliwe jest to tylko w warunkach pozamijskich (np. w trakcie wycieczek), a to ze względu na duży poziom zakłóceń przemysłowych w miastach. W mieście opisane układy mogą służyć np. do obserwacji burz oraz poziomu zakłóceń przemysłowych. Takie ich zastosowanie także może być bardzo interesujące.

Wiele informacji na temat odbioru fal elektromagnetycznych o bardzo niskich częstotliwościach, poniżej 30kHz, a także o antenach stosowanych do tego typu odbiorników, zamieszczono wcześniej w numerze 10/2011 EdW, w artykule *Odbiór fal radiowych ELF-VLF*. Artykuł ten, w postaci pliku PDF, dostępny jest też w Elportalu, wśród materiałów dodatkowych do niniejszego wydania EdW.

Opisany dalej projekt prezentuje dwa, trzy, a nawet cztery odbiorniki, przeznaczone do odbioru sygnałów radiowych (fal elektromagnetycznych) w zakresie od 3Hz do 30kHz, a więc obejmującym pasma: ELF, SLF, ULF i VLF. Pierwszy z odbiorników (I) współpracuje z anteną drutową, reagującą na składową elektryczną pola elektromagnetycznego. Wykonano go w dwóch wersjach układowych (I-a i I-b). Trzeci i czwarty przeznaczone jest do współpracy z anteną pętlową, reagującą na składową magnetyczną pola elektromagnetycznego. W artykule dodatkowo opisany jest też układ wytwarzający symetryczne napięcie zasilania oraz układy poprawiające komfort pracy przez zwiększenie odporności na sygnały niepożądane: dwa filtry dolnoprzepustowe o paśmie odpowiednio 200Hz i 20kHz, filtr pasmowo-zaporowy, redukujący poziom

przydźwięku sieciowego o częstotliwości 50Hz oraz układ optoizolatora sygnałów m.cz. Opisane układy nie wymagają strojenia ani uruchamiania, dzięki czemu może wykonać je nawet początkujący elektronik. Dużą zaletą tych układów jest niski koszt ich wykonania.

W końcowej części artykułu zaprezentowana jest konfiguracja oraz sposób użycia programu *Spectrum Lab*, umożliwiającego odbiór i analizę sygnałów w pasmach od ELF do VLF.

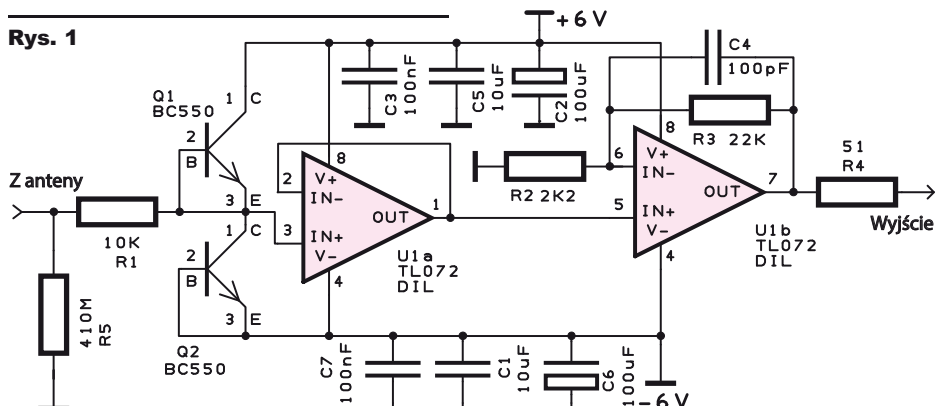
Odbiornik przeznaczony do współpracy z anteną elektryczną

Opisany w tej części artykułu odbiornik można wykonać w dwóch wersjach układowych (I-a oraz I-b), różniących się zastosowanymi rozwiązaniami oraz wynikającymi z nich parametrami użytkowymi. Odbiornik w drugiej wersji układowej lepiej radzi sobie podczas słonecznej i wietrznej pogody, lecz jest mniej odporny na zakłócenia przemysłowe. Sercem odbiorników w obu wersjach układowych jest wzmacniacz o bardzo dużej rezystancji wejściowej pierwszego stopnia, która jest konieczna do prawidłowej pracy układu. Stosowane w tym zakresie fali anteny są pod względem elektrycznym „krótkie”, czyli ich długość jest zawsze dużo mniej-

sza od długości odbieranej fali. Antena taka zachowuje się jak źródło napięciowe, podłączone przez kondensator o małej pojemności (tym mniejszej, im krótsza antena). Obie wersje układowe odbiornika wykorzystują popularny układ scalony TL072, zawierający dwa niezależne wzmacniacze operacyjne. Impedancja wejściowa wzmacniaczy operacyjnych z serii TL07x wynosi około 1TΩ (teraoma), czyli 1000GΩ (gigaomów). W praktyce tak duży opór wejściowy układu można uzyskać tylko wtedy, gdy część układu zostanie zmontowana techniką przestrzenną (bez użycia płytki drukowanej). W przypadku montażu układu na płytce drukowanej, na rezystancję wejściową układu ma wpływ m.in. rodzaj użytego laminatu czy nawet zabrudzenie płytki drukowanej, powodujące powstanie tzw. prądów upływu.

Wzmacniacze z serii TL07x charakteryzują się dużą zastępczą rezystancją szumową, przez co doskonale nadają się do współpracy z układami o dużej rezystancji źródła sygnału, a współpracując z nimi, szumią znacznie mniej niż uważane za niskoszumne wzmacniacze operacyjne serii NE5532. Wzmacniacze NE5532 mają natomiast lepsze parametry szumowe przy niskiej rezystancji źródła sygnału. Bardziej zainteresowanych problematyką

Rys. 1



szumów w układach ze wzmacniaczami operacyjnymi odsyłam do książki Piotra Góreckiego „Wzmacniacze operacyjne”, gdzie poruszone zagadnienia zostały wyjaśnione znacznie obszerniej i w bardzo przystępny sposób. Proponuję wykonanie obu wersji odbiornika – są one montowane na tej samej płytce drukowanej. Fotografie zamieszczam w artykule różniąc się nieco od schematów montażowych ze względu na zamiany wprowadzone podczas uruchomienia układów.

Wersja I-a do anteny elektrycznej

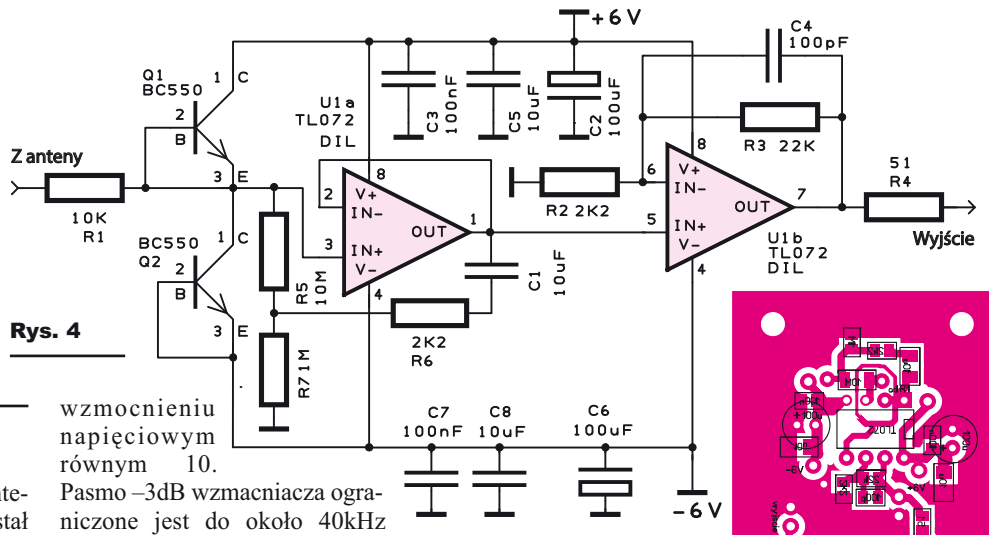
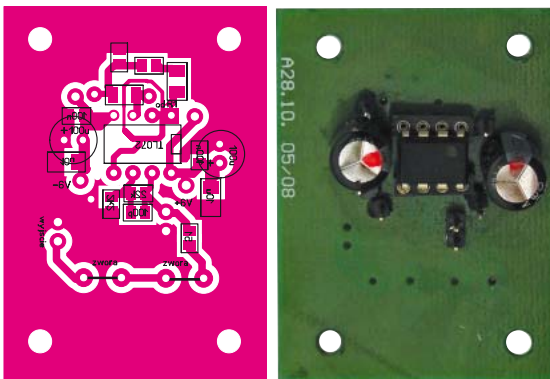
Schemat odbiornika do współpracy z anteną elektryczną w wersji I-a pokazany został na **rysunku 1**. Wzmacniacz operacyjny U1a układu TL072 pracuje w konfiguracji wtórnika napięciowego. Rezystancja wejściowa w tym układzie w praktyce równa jest rezystancji rezystora R5, który rozładowuje napięcia elektrostatyczne powstałe w antenie. Zastosowany przeze mnie rezystor R5 powstał przez szeregowanie połączenie pięciu rezystorów 82MΩ. Przyjęte rozwiązanie wynikało z trudności w nabyciu pojedynczych oporników o odpowiedniej wartości rezystancji w przystępnej cenie. W praktyce można tutaj zastosować także pojedynczy rezystor z zakresu od 200MΩ do 1GΩ. Większe wartości rezystancji należy stosować przy krótszych antenach. Trzeba jednak pamiętać, że rezystancja R5 jest źródłem szumów o napięciu rosnącym z jej wartością. Równoległe do opornika R5 można podłączyć neonówkę lub odgromnik gazowany w celu zwiększenia skuteczności rozładowywania napięć elektrostatycznych. Złącza C-B tranzystorów Q1 i Q2 pracują jako diody, których zadaniem jest ograniczanie maksymalnego napięcia na wejściu wzmacniacza operacyjnego do wartości niewykraczających o więcej niż 0,6 V poza wartości napięć zasilania symetrycznego. Zastosowanie tranzystorów bipolarnych ze zwartymi złączami B-E zamiast typowych diod wynika z ich bardzo małych prądów wpływu. Rezystor R1 ogranicza prąd płynący przez tranzystory Q1, Q2. Wzmacniacz U1b pracuje jako wzmacniacz nieodwracający o

Rys. 4

wzmocnieniu napięciowym równym 10. Pasma -3dB wzmacniacza ograniczone jest do około 40kHz przez kondensator C4 w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza U1b.

Montaż układu. W celu zminimalizowania prądów upływu, elementy zabezpieczenia elektrostatycznego Q1, Q2, R1 i rezystor R5 zmontowano metodą przestrzenną, bez użycia płytki drukowanej. Elementy te należy przylutować do nóżki 3 wzmacniacza operacyjnego „wiszącej” w powietrzu. Jako wejście sygnałowe zastosowano złącze typu SMA. W złączu tym izolatorem jest teflon, który ma bardzo dużą rezystancję, znacznie większą niż typowe tworzywa sztuczne stosowane w tanich złączach, a w dodatku jest materiałem hydrofobowym (jego powierzchnia nie wchłania wilgoci). Drugą możliwością zapewnienia bardzo wysokiej rezystancji jest „otoczenie” wejścia nieodwracającego wzmacniacza pierścieniem podłączonym do jego wyjścia, ponieważ wzmacniacz operacyjny w konfiguracji wtórnika ma wzmocnienie napięciowe równe jeden i nie odwraca fazy, napięcie na wyjściu wzmacniacza i na wejściu nieodwracającym ma identyczną wartość i są one w fazie, przez co nie ma między nimi różnicy potencjałów i dlatego nie popłynie praktycznie żaden prąd upływu z wyjścia wzmacniacza do jego wejścia. Prądy upływu z pozostałej części układu będą oddziaływać tylko na wyjście wzmacniacza operacyjnego i nie będą w stanie zmienić jego napięcia wyjściowego. Wyjście wzmacniacza ma znikomą rezystancję wejściową, a tym samym zastosowana pętla odizoluje wejście wzmacniacza operacyjnego od prądów upływu reszty układu. W tym wypadku wyprowadzenie 3 możemy włutować do płytki. Szczegóły tego rozwiązania widzimy na schemacie montażowym układu na **rysunku 2**. Zmontowany układ pokazany jest na **fotografii 3**.

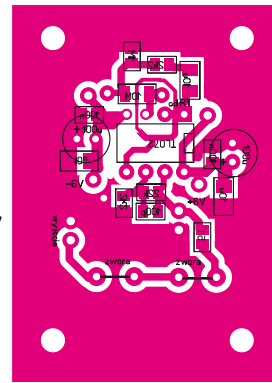
Rys. 2 Fot. 3



Wersja I-b do anteny elektrycznej

Główną wadą układu z **rysunku 1** jest duża wartość zastosowanego rezystora R5. Oporniki o dużej rezystancji są nie tylko trudniej dostępne, ale są również znaczącym źródłem szumów – tym większym, im większa jest wartość rezystancji rezystora. Na **rysunku 4** zaprezentowana jest modyfikacja wejścia odbiornika, pozwalająca zastosować rezystory o mniejszej wartości rezystancji, przy zachowanej dużej oporności wejściowej układu dla napięć zmiennych. W układzie wykorzystano rozwiązanie nazwane „bootstrap”. Ponieważ sygnał wyjściowy jest w tej samej fazie co wejściowy, a amplitudy obu sygnałów praktycznie są sobie równe, przez opornik R5 nie płynie prąd, a tym samym rezystancja wejściowa dla zmiennych przebiegów napięciowych jest bardzo wysoka. Rezystor R6 zapobiega wzbudzeniu układu. Im większa jest jego wartość, tym układ trudniej się wzbudza. Zwiększenie wartości opornika R6 zmniejsza jednak skuteczność działania bootstrapu. Wartość rezystora R6 najlepiej dobrać doświadczalnie z zakresu 2,2kΩ – 47kΩ. Główną zaletą użycia rezystora o mniejszej wartości rezystancji w stosunku do układu z **rysunku 1** jest szybsze rozładowanie napięć elektrostatycznych z anteny. Do tego układu odnoszą się także wszystkie uwagi przedstawione w opisie odbiornika w wersji I-a. Schemat montażowy układu przedstawiono na **rysunku 5**.

Do podłączenia anteny do odbiornika, reagującego na składową elektryczną pola elektromagnetycznego, **nie należy używać kabli koncentrycznych**, gdyż działają jak dzielnik pojemnościowy napięcia. Podczas burz należy odłączać wejście



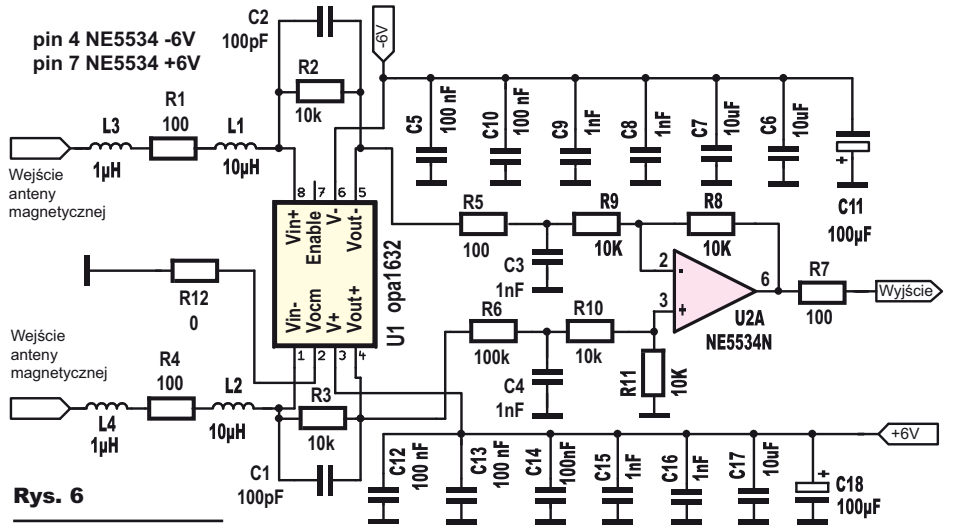
Rys. 5

odbiornika od anteny, a samą antenę względnie uziemić!

Opisane powyżej odbiorniki składowej elektrycznej optymalizowane są dla krótkich anten. Dla anten dłuższych niż parę metrów rezystancję wejściową opisanych odbiorników można zmniejszyć, co podniesie odporność układów na zakłócenia. W razie potrzeby wzmacnienie wszystkich opisanych odbiorników można zmniejszyć lub zwiększyć.

Odbiornik współpracujący z anteną magnetyczną I

Schemat opisywanego układu zamieszczony został na **rysunku 6**. W przeciwieństwie do wcześniejszych układów, wzmacniacz współpracujący z anteną magnetyczną musi charakteryzować się niską impedancją wejściową oraz, analogicznie jak w poprzednio opisywanym układzie, możliwie najniższym poziomem szumów własnych. Układ taki można zrealizować z użyciem np. niskoszumnego wzmacniacza z wejściem różnicowym OPA1632. Wejście różnicowe tego wzmacniacza bardzo dobrze współpracuje z antenami magnetycznymi. Układ OPA1632 wyróżnia się doskonałymi parametrami szumowymi, znacznie lepszymi niż w przypadku powszechnie stosowanych niskoszumných wzmacniaczy typu NE5534. Dodatkową zaletą tego układu są bardzo małe zniekształcenia nieliniowe, wynoszące tylko 0,000022%. Wzmocnienie układu OPA1632 zależy od ilorazu rezystancji w sprzężeniu zwrotnym wzmacniacza i rezystancji na jego wejściu. Kondensatory C1, C2 zmniejszają wzmocnienie dla sygnałów o wysokich częstotliwościach. Sygnał ze wzmacniacza OPA1632 jest podawany na wzmacniacz odedjmujący, zrealizowany na układzie NE5534. W tym miejscu parametry szumowe nie są już tak istotne, z uwagi na wzmocnienie sygnału, wprowadzone przez wcześniejszy stopień. Na wyjściu wzmacniacza operacyjnego NE5534 umieszczono opornik o wartości 100 omów, zapobiegający ewentualnym wzbudzeniom układu, które mogą zostać wywołane pojemnościowym obciążeniem



Rys. 6

wyjścia wzmacniacza (są nim np. kable audio prowadzące do karty dźwiękowej komputera). Rezystor R12 pełni funkcję zwory.

Montaż układu. Płytką drukowaną umożliwia montaż wzmacniaczy OPA1632 zarówno w obudowie SO8, jak i MSOP8. W przypadku stosowania wzmacniacza OPA1632 w obudowie MSOP8, metalową płytkę znajdującą się pod wzmacniaczem lutujemy do masy, po uprzednim sprawdzeniu napięć na wyjściach układu OPA1632 i NE5534, które powinny wynosić 0V. Wspomniana płytka to tzw. pad termiczny, którego zadaniem jest odprowadzenie ciepła wytworzonego w układzie OPA1632. Schemat montażowy obu stron płytki pokazany jest na **rysunkach 7 i 8**, a zmontowany układ na **fotografii 9**. W układzie tym można łatwo ustawić przesunięcie składowej stałej. Szczegóły tego rozwiązania zainteresowani znajdują w materiałach dodatkowych w Elportalu. Na płytce jest przewidziane miejsce na dodatkowe elementy, które są na płytce na rysunku 7 i 8 nieopisane – niemontowane.

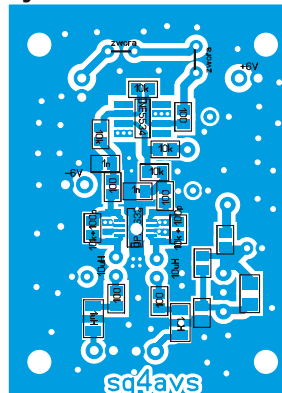
Odbiornik współpracujący z anteną magnetyczną II

Odbiornik do współpracy z anteną pętlową zbudowany jest na układzie scalonym SSM2019, według jego typowej noty aplikacyjnej. Układ ten charaktery-

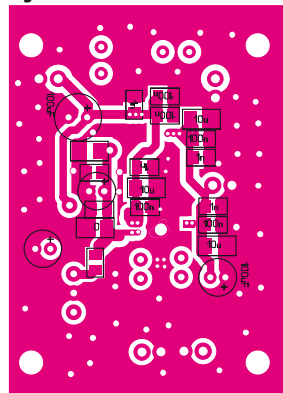
zuje się przede wszystkim bardzo małym napięciem i prądem szumów już dla bardzo niskich częstotliwości. Cechy te w prezentowanej aplikacji mają szczególne znaczenie z uwagi na niski poziom odbieranych sygnałów, co jest kluczowe, gdy chcemy odbierać sygnały powstające w wyniku zjawiska rezonansu Schumanna. Schemat odbiornika pokazany jest na **rysunku 10**. Ważną cechą układu SSM2019 jest silna zależność napięcia szumów od wzmocnienia. Wzmacniacz SSM2019 szumi najmniej dla wzmocnienia równego 1000 razy, a poziom szumów wzmacniacza rośnie ze spadkiem wzmocnienia. Tak wysoka wartość wzmocnienia jest korzystna, gdyż antena pętlowa daje bardzo niski poziom sygnału przekazywanego dalej na wejście wzmacniacza. Pokazany na schemacie sposób podłączenia anteny pętlowej nie jest optymalny. Lepsze byłoby podłączenie jak na rysunku 3.c karty katalogowej, ale wymaga to nawijania uzwojeń anteny bifilarnej, tzn. dwoma drutami jednocześnie i odpowiedniego podłączenia końców wyprowadzeń anteny (koniec pierwszego uzwojenia z początkiem drugiego – punkt ten podłącza się do masy, zaś dwa pozostałe przewody stanowią wyjście anteny, w tym wypadku oporniki R2 i R3 należy usunąć). Połączenie takie jest korzystniejsze z punktu widzenia poziomu odbieranych sygnałów

i szumów własnych układu, ale trudniejsze do realizacji. Kondensator C7 zapobiega wzbudzeniom

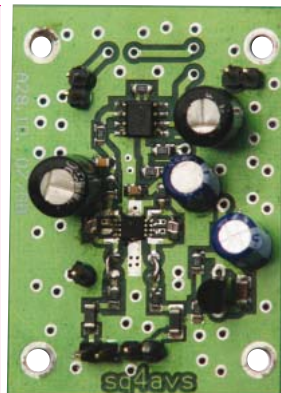
Rys. 7



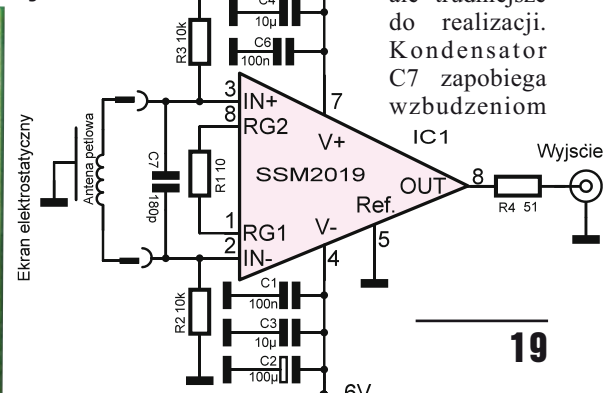
Rys. 8



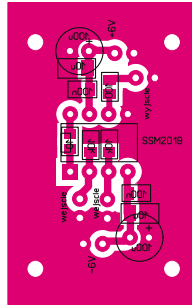
Fot. 9



Rys. 10

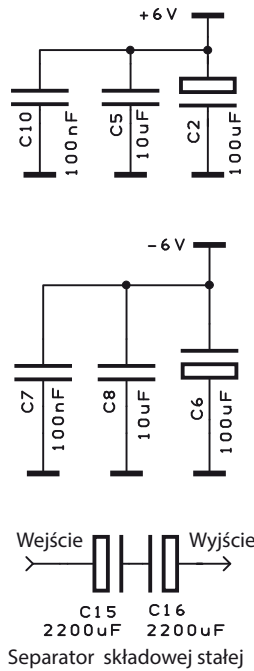
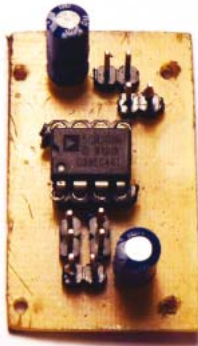


wzmacniacza na częstotliwościach radiowych, jednak mój układ był stabilny nawet bez tego kondensatora. Rezonans własny mojej anteny jest położony niżej niż pasmo pracy wzmacniacza. Aby w pełni wykorzystać zalety układu, musi on współpracować z anteną o niskiej rezystancji wewnętrznej, dla anteny pętlowej o rezystancji około 2 kiloomów, wzmacniacz ma napięcie szumów 2 razy niższe niż bardzo niskoszumny, powszechnie uznany w profesjonalnych zastosowaniach, wzmacniacz OPA1632. Rezystancję anteny można jeszcze zmniejszyć, stosując grubszy (lecz droższy) drut nawojowy. W praktyce bardziej opłaca się zastosować cieńszy drut, godząc się ze wzrostem rezystancji anteny, nawijając jednak większą liczbę zwojów. Większa liczba zwojów daje wyższe napięcie wyjściowe z anteny, natomiast stosunek sygnał/szum polepsza się mimo wzrostu szumów termicznych, generowanych na rezystancji anteny. Schemat montażowy modułu pokazano na **rysunku 11**, a zmontowany układ na **fotografii 12**. Poprawnie zmontowany układ powinien zadziałać od pierwszego włączenia.

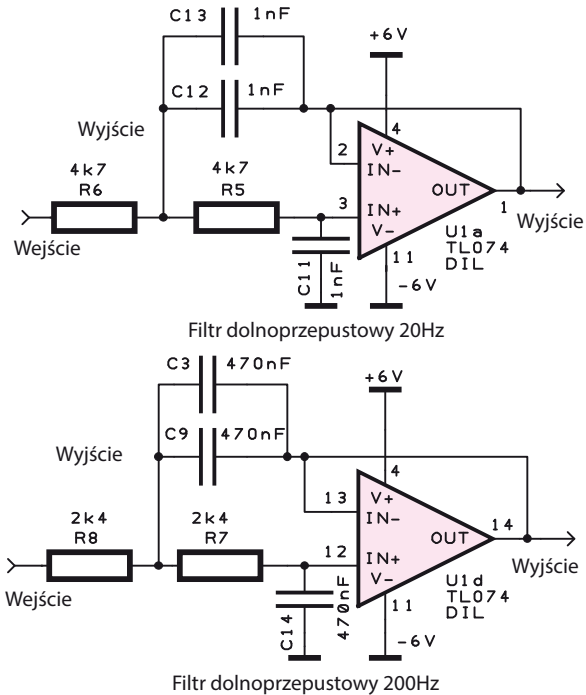


Rys. 11

Fot. 12



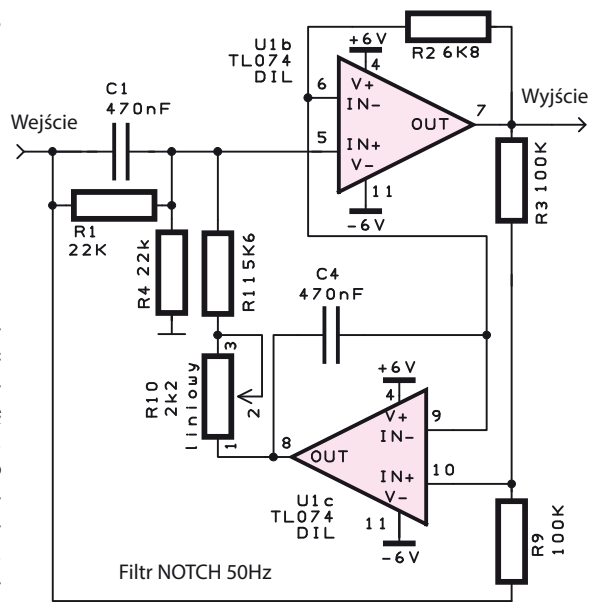
Rys. 16



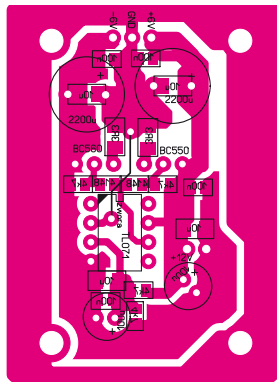
Zasilanie układów

Opisane właśnie układy powinny być zasilane napięciem symetrycznym z pary baterii lub akumulatorów albo za pomocą układu wytwarzającego „sztuczną masę”. Zastosowanie takiego właśnie zasilania symetrycz-

nego znacząco upraszcza konstrukcję opisanych układów. W przypadku konieczności zastosowania zasilania innego niż akumulatorowe czy bateryjne, należy starannie wybrać rozwiązanie układowe. Należy przy tym pamiętać, że wszelkie zasilacze impulsowe i przetwornice DC/DC są źródłem zakłóceń napięciowych zbyt silnych, by mogły być użyte wprost. Typowe przetwornice impulsowe nie nadają się do zasilania opisanych układów. Schemat układu wytwarzającego tzw. sztuczną masę z zastosowaniem wzmacniacza operacyjnego pokazano na **rysunku 13**. Wydajność prądową wzmacniacza operacyjnego zwiększa komplementarna para tranzystorów, podłączona do jego wyjścia. Rezystory R5, R6 oraz diody D1, D2 ustalają punkt pracy pary komplementarnej. Schemat

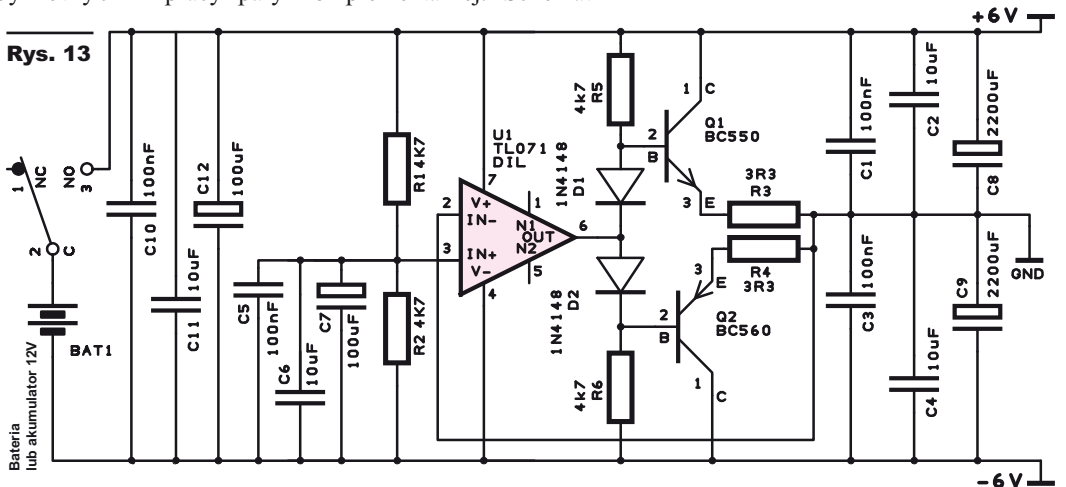


montażowy modułu zaprezentowano na **rysunku 14**, a zmontowany układ na **fotografii 15**.



Rys. 14

Fot. 15



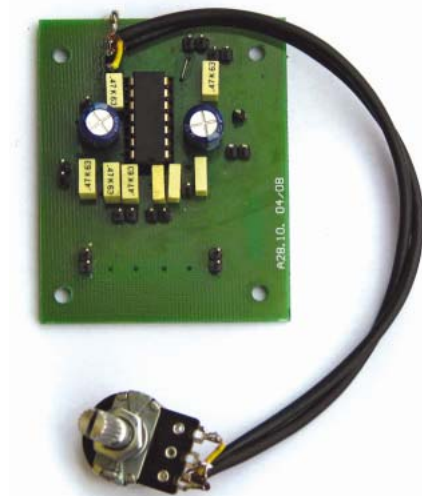
Rys. 13

Moduł filtrów dolnoprzepustowych oraz filtru „notch”

Zadaniem filtrów dolnoprzepustowych jest ograniczenie pasma odbieranego sygnału, który jest następnie przetwarzany przez kartę dźwiękową komputera. Natomiast zadaniem filtru typu „notch” (czyli bardzo wąskiego filtru pasmowo-zaporowego) jest eliminacja sygnałów o częstotliwości 50Hz. Sygnał o częstotliwości 50Hz, czyli tzw. przydźwięk sieciowy, jest najsilniejszym sygnałem, jaki występuje podczas obserwacji widma ELF. I najczęściej to właśnie jego wysoki poziom skutecznie ogranicza możliwość obserwacji słabych sygnałów w tym pasmie. Wymienione układy filtrów zostały zaprojektowane z użyciem popularnego układu scalonego TL074, zawierającego cztery niskoszumne wzmacniacze operacyjne w jednej obudowie. Schemat wymienionych układów pokazany został na rysunku 16.

Filtry dolnoprzepustowe. Filtry dolnoprzepustowe wykonano w układzie Sallen-Keya. Filtry wykonane w tej topologii nie mają tendencji do wzbudzeń. Wzmacniacz U1A pracuje w filtrze o paśmie 20kHz. Na wzmacniaczu UID wykonany jest filtr o paśmie 200Hz. Oba filtry mają dobroć Q równą 2. W zależności od rodzaju przeprowadzanych obserwacji wybiera się odpowiedni filtr. Zawsze należy ograniczać pasmo do minimum zakresu obserwowanych częstotliwości.

Pasmowo-zaporowy selektywny typu „notch”. Opisany układ filtru pasmowo-zaporowego pozwala bardzo skutecznie zredukować poziom niepożądanego przydźwięku w analizowanym widmie. Filtr pasmowo-zaporowy wykonano w topologii Fliege z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych U1B i U1C układu scalonego TL074. Główną zaletą tej konfiguracji filtru jest niska wrażliwość na rozrzut zastosowanych elementów. Tolerancja dokładności może wynosić do 5%, prak-

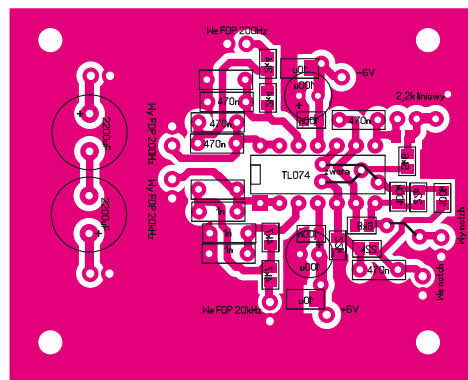


Fot. 17

tycznie bez wpływu na maksymalne tłumienie układu, z wyjątkiem oporników R3 i R9, które mogą się różnić rezystancją maksymalnie o 0,5%. Im większa różnica występuje między rezystorami R3 i R9, tym mniejsze jest maksymalne tłumienie filtru. Zmiana wartości większości elementów RC powoduje jedynie zmianę częstotliwość pracy filtru.

Inne typy filtrów pasmowo-zaporowych, jak np. wykonane w topologii „podwójne T”, wymagają dobrania elementów z jak największą dokładnością, gdyż zmiana wartości elementów powoduje znaczne zmniejszenie tłumienia filtru.

Dokładne dostrojenie do częstotliwości 50Hz realizowane jest za pomocą potencjometru R10, wyprowadzonego na zewnątrz obudowy układu (obudowę samego potencjometru należy podłączyć do masy układu tylko w jednym miejscu). Takie rozwiązanie, w którym częstotliwość środkową filtru zaporowego ustala się za pomocą zewnętrznego elementu regulowanego (potencjometr), zapewnia eliminację rozrzutu wartości zastosowanych elementów i ich starzenia się. W



Rys. 18

poprawnie zbudowanym układzie tłumienie sygnału przydźwięku sieciowego wynosi do 50 dB. Separację od składowej stałej można uzyskać za pomocą dwóch kondensatorów o pojemności 2200µF, połączonych szeregowo ujemnymi elektrodami. Takie rozwiązanie pozwala na proste eksperymenty z zewnętrznymi filtrami. Ewentualnym wzbudzeniem wzmacniaczy operacyjnych spowodowanym obciążeniem pojemnościowym wzmacniaczy (wnoszonym przez kable audio) można zapobiec, lutując szeregowo oporniki 68Ω bezpośrednio do gniazd cinch (RCA), podłączonych do wyjść wzmacniaczy. Wzbudzenie filtru notch, w razie jego wystąpienia, można usunąć, dolutowując równoległe do opornika R3 kondensator o pojemności 10–22pF – ten sposób został opisany przez Piotra Góreckiego w ćwiczeniach Oślej łączki. W egzemplarzu modelowym wzbudzenie nie występowało. Zmontowany układ, zawierający filtr „notch” oraz filtry dolnoprzepustowe, pokazano na fotografii 17, schemat montażowy na rysunku 18.

W drugiej części artykułu przedstawiona będzie wersja z optoizolacją oraz dodatkowe wskazówki i informacje.

Rafał Orodziński
sq4avs@gmail.com

R E K L A M A

Przewody połączeniowe do płytek stykowych, zestawów uruchomieniowych itp.



końcówki: męski-haczyk
długość 20cm
1 złącze 10 pin

cena: 17zł
SD PRZEWODY-40 M-HACZYK



końcówki: męski-żeński
długość 20cm
40 sztuk

cena: 14zł
SD PRZEWODY-40 M-Ż

www.sklep.avt.pl tel.: (22) 257 84 50 handlowy@avt.pl