



# Multiodbiornik ELF-VLF

kit  
3054  
AVT

**część 1**



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.

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.

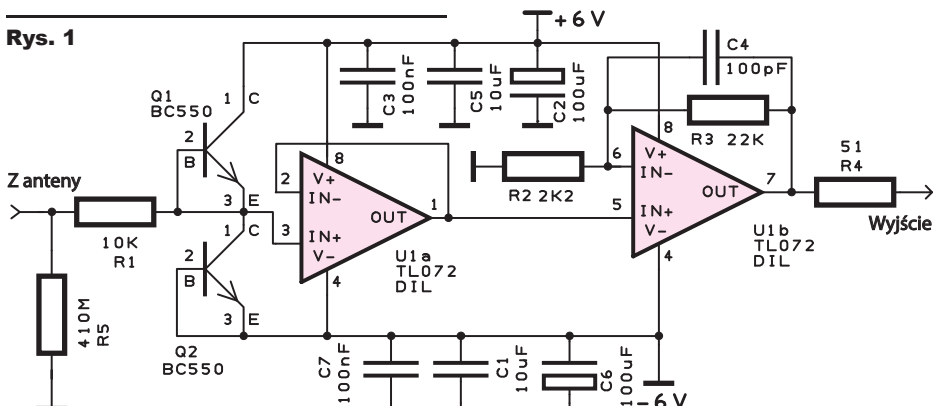
## Odbiornik przeznaczony do współpracy z anteną elektryczną

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 fale 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

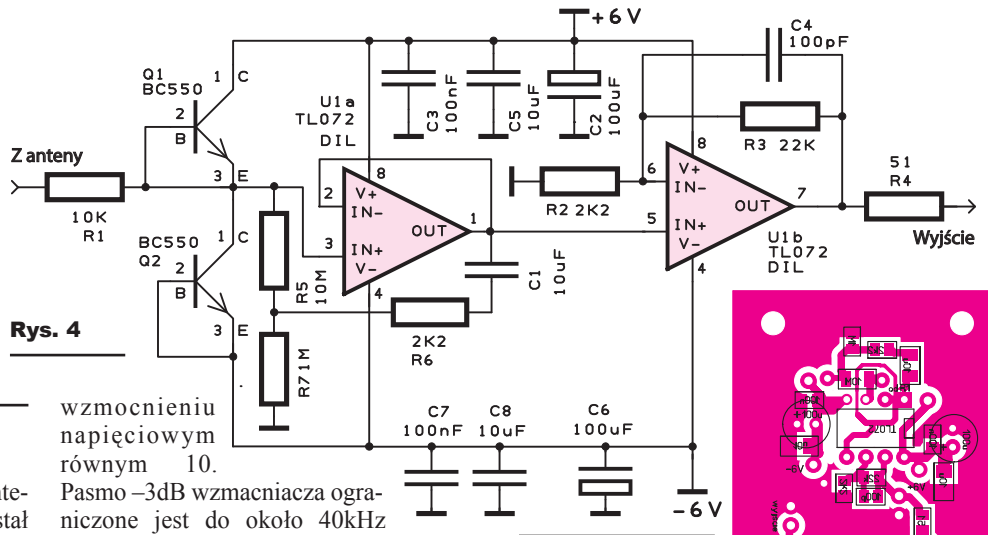
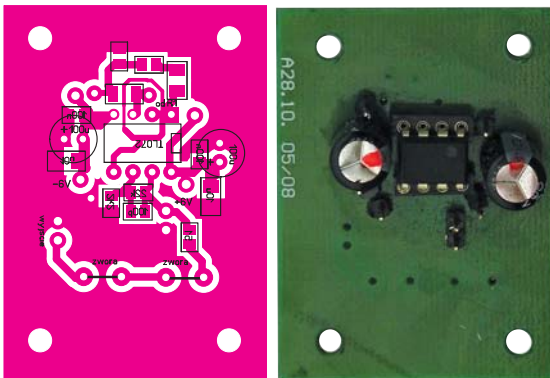
Schemat odbiornika do współpracy z anteną elektryczną w wersji I-a pokazany został na **rysunku 1**. Wzmacniacz operacyjny U1a układu TL072 pracuje w konfiguracji wtórnika napięciowego. Rezystancja wejściowa w tym układzie w praktyce równa jest rezystancji rezystora R5, który rozładowuje napięcia elektrostatyczne powstałe w antenie. Zastosowany przeze mnie rezystor R5 powstał przez szeregowanie 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 upływu. 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**.

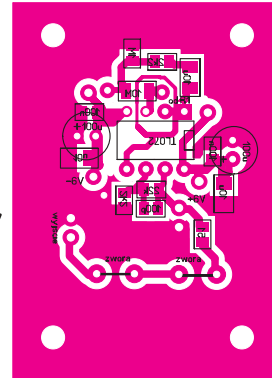
Rys. 2 Fot. 3



## 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

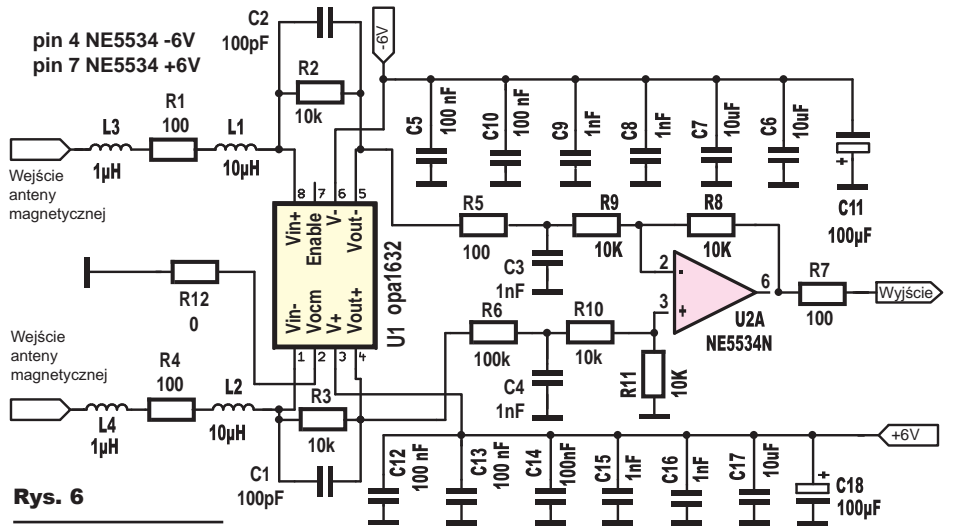


odbiornika od anteny, a samą antenę względnie uziemić!

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 niskoszumnych 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 odedymujący, 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 wzmacniacza 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 płycie jest przewidziane miejsce na dodatkowe elementy, które są na płycie na rysunku 7 i 8 nieopisane – niemontowane.

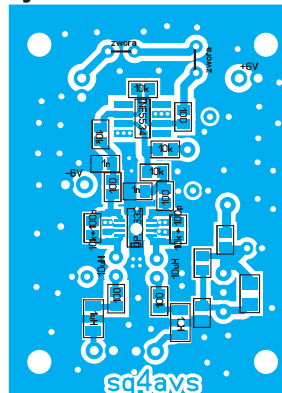
### Odbiornik współpracujący z anteną magnetyczną II

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

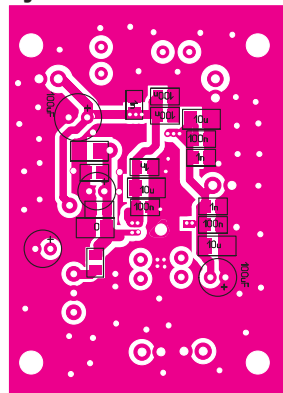
zuje się przede wszystkim bardzo małym napięciem i prądem szumów już dla bardzo niskich częstotliwości. Cechy te w prezentowanej aplikacji mają szczególne znaczenie z uwagi na niski poziom odbieranych sygnałów, co jest kluczowe, gdy chcemy odbierać sygnały powstające w wyniku zjawiska rezonansu Schumanna. 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

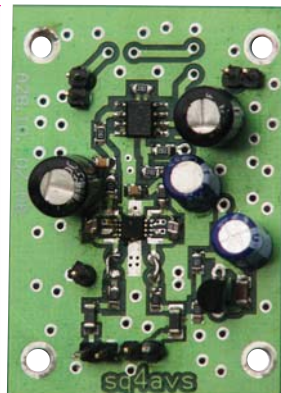
Rys. 7



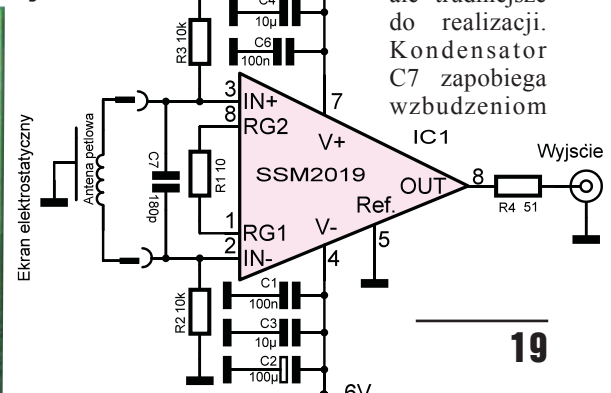
Rys. 8



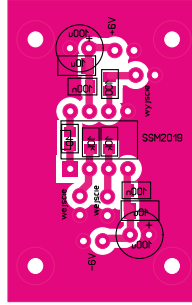
Fot. 9



Rys. 10

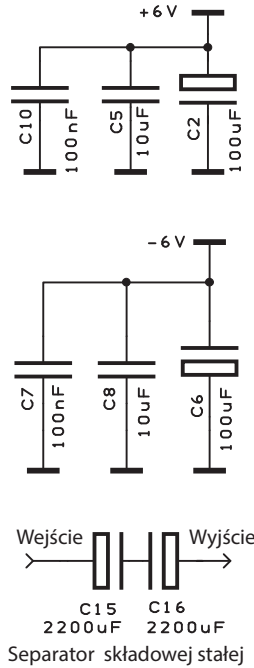
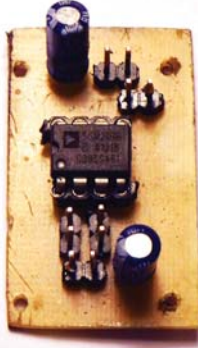


wzmacniacza na częstotliwościach radiowych, jednak mój układ był stabilny nawet bez tego kondensatora. Rezonans własny mojej anteny jest położony niżej niż pasmo pracy wzmacniacza. Aby w pełni wykorzystać zalety układu, musi on współpracować z anteną o niskiej rezystancji wewnętrznej, dla anteny pętlowej 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.

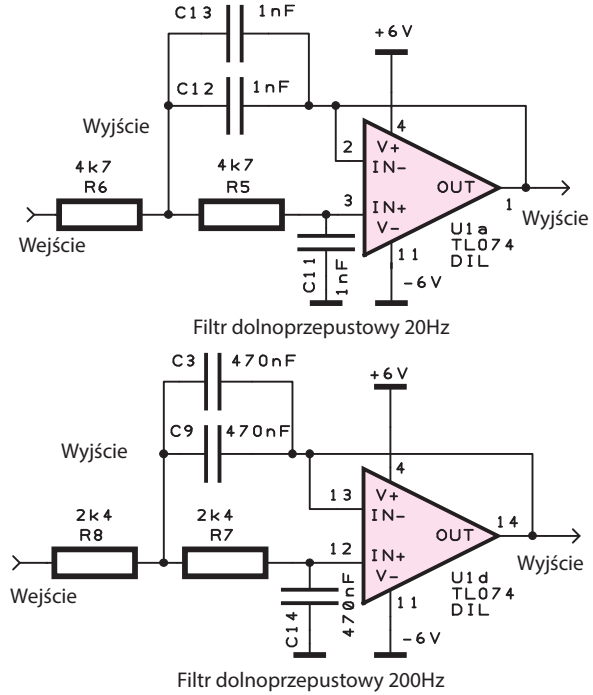


Rys. 11

Fot. 12



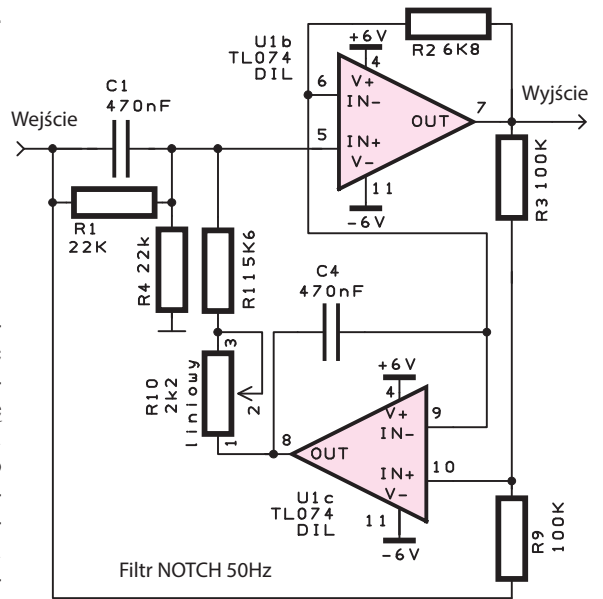
Rys. 16



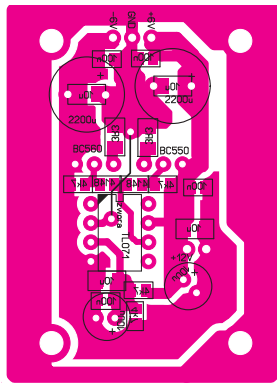
## Zasilanie układów

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 baterijne, 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

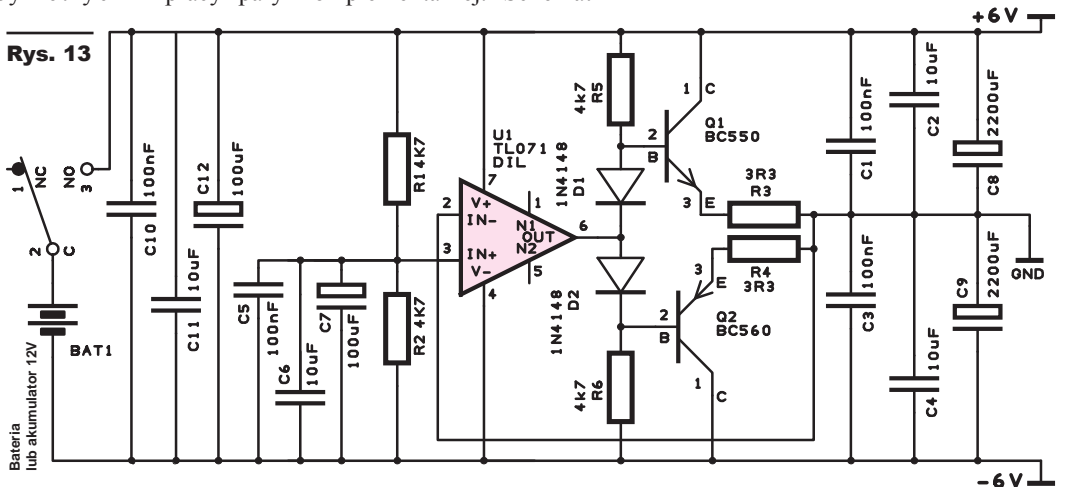


montażowy modułu zaprezentowano na **rysunku 14**, a zmontowany układ na **fotografii 15**.



Rys. 14

Fot. 15



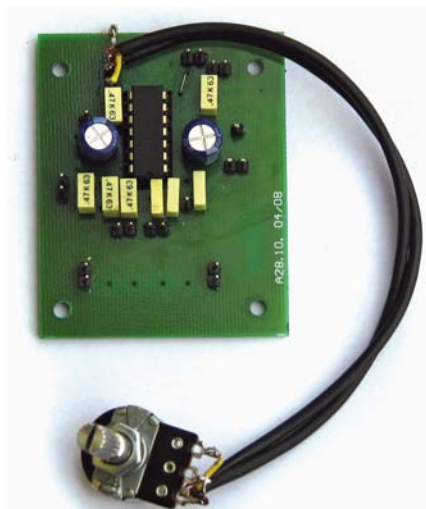
Rys. 13

## 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-

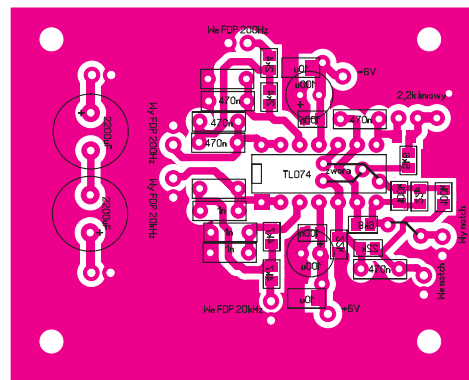


Fot. 17

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  $2200\mu\text{F}$ , 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  $68\Omega$  bezpośrednio do gniazd cinch (RCA), podłączonych do wyjść wzmacniaczy. Wzbudzenie filtru notch, w razie jego wystąpienia, można usunąć, dolutowując równolegle do opornika R3 kondensator o pojemności  $10\text{--}22\text{pF}$  – ten sposób został opisany przez Piotra Góreckiego w ćwiczeniach Ośleń 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





# Multiodbiornik ELF-VLF

kit

3054

AVT

CZĘŚĆ 2

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.

## Układ optoizolacji sygnałów audio

Główną zaletą prezentowanego układu z optoizolacją sygnałów audio jest brak ograniczenia pasma przenoszonych sygnałów od strony najniższych częstotliwości. W przeciwieństwie do typowego sprzężenia transformatorowego, opisany układ może przenosić także sygnały stałonapięciowe. Schemat układu pokazano na rysunku 19. W układzie zastosowano specjalny rodzaj transoptora, mający dwa fotodetektory: jeden pracuje jako „klasyczny” optoizolator, zaś druga fotodioda, dzięki podłączeniu do wejścia odwracającego wzmacniacza sterującego diodę LED, kompensuje nieliniowość diod LED. Fotodiody pracują w tym układzie w trybie fotowoltaicznym. Możliwe jest wykonanie układu optoizolatora tak, aby diody pracowały w trybie fotoprzewodnictwa. Praca fotodiod w trybie fotowoltaicznym daje jednak znacznie lepszą stabilność termiczną, dużo niższe szumy, znacząco lepszą liniowość, a przede wszystkim dużo lepszą dynamikę układu niż praca w trybie fotoprzewodnictwa. Zaletą pracy fotodiod w trybie fotoprzewodnictwa byłoby natomiast szersze pasmo przenoszonych częstotliwości, co jednak w naszym zastosowaniu nie ma w ogóle znaczenia. Można zatem przyjąć, że ograniczenie pasma przez transoptor jest w tym przypadku korzystne. W układzie pokazanym na rysunku 19 poziomy sygnałów wyjściowych są ograniczone do zakresu od 0 do 0,8–1V. W celu zapewnienia prawidłowej pracy tego układu z opisanymi w artykule odbiornikami, należy przesunąć poziom sygnałów wejściowych na wejściu wzmacniacza sterującego diodę LED o około 0,4–0,5V, co pozwala uzyskać maksymalny dynamiczny zakres pracy układu optoizolatora. Funkcję przesuwnika poziomu napięć realizuje wzmacniacz OP1A pracujący w układzie

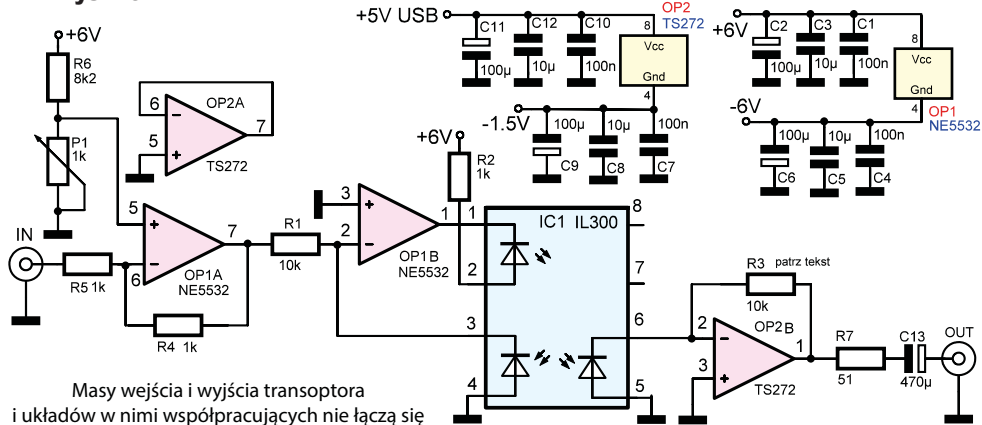
odwracającym. P1 ustawia się tak, by napięcie na wyjściu 7 wzmacniacza NE5532 po podłączeniu sygnału z odbiornika wynosiło od 0,4 do 0,5V. Pozwala to skompensować napięcie niezrównoważenia wzmacniaczy zastosowanych w odbiornikach. Niestety optymalne położenie dla każdego odbiornika jest nieco inne, ze względu na różne napięcia niezrównoważenia układów wzmacniaczy – zależy ono od egzemplarza układu scalonego. Napięcie to możemy również ustalić na wejściu 5 wzmacniacza NE5532 na stałe na 0,45, co spowoduje maksymalnie kilkunastoprocentowy spadek dynamiki układu względem nastaw optymalizowanych dla każdego odbiornika. Odpowiednikiem wzmocnienia w tego typu transoptorach jest parametr K3. Wartość parametru K3 zależy od indeksu literowego w oznaczeniu układu i tak dla transoptora IL300 firmy Vishay z indeksem literowym A wartość wzmocnienia wynosi: 0,560–0,623; F 0,950–1,056; J 1,449–1,610 a transoptora LOC110 firmy Clare z indeksem literowym C = 0,668–0,732; G = 0,975–1,072 a H = 1,073–1,179. Ponieważ zależy nam na przeniesieniu sygnałów napięciowych z wejścia transoptora na jego wyjście w stosunku 1 do 1, wartość opornika R3 należy dobrać w zależności

od zastosowanego transoptora zgodnie ze wzorem:

$$R3 = \frac{R1}{K3}$$

gdzie R1 i R3 jest rezystancją wyrażoną w kiloomach. Do układu należy wstawić wartość najbliższą wyliczonej. Układ po stronie „wtórnej” transoptora zasilany jest z gniazda 5V złącza USB. Napięcie –1,5V uzyskiwane jest z baterii, która jest rozłączana, gdy układ jest nieużywany. Baterię można zastąpić dobrej jakości przetwornicą wytwarzającą ujemne napięcie zasilania z napięcia +5V. W układzie tym nie należy stosować wzmacniaczy typu LM358. Zastosowany przeze mnie wzmacniacz TS272 jest wzmacniaczem, którego napięcie wyjściowe i wyjściowe może być zbliżone do potencjału masy. Można go zastąpić układem TLC272. W użytym przeze mnie egzemplarzu dodatkowe ujemne napięcie zasilania poprawiło parametry układu. Niewykorzystany w moim wypadku wzmacniacz OP2A można po przeróbce płytki drukowanej zastosować do przesuwania poziomu napięć wyjściowych tak, aby sterować nim wejście liniowe karty dźwiękowej. Dzielnik podłączony do wejścia nieodwracającego wzmacnia-

Rys. 19



cza musimy wtedy dobrać tak, by uzyskać na wyjściu wzmacniacza – bez sygnału wejściowego – napięcie równe napięciu na wejściu karty dźwiękowej (za kondensatorem separującym), dzięki czemu układ będzie mógł przenosić nawet sygnały stałonapięciowe, a sam sygnał wyjściowy podłączyć przez rezystor o wartości kilkuset omów. W moim rozwiązaniu tego nie zrobiłem, jako że zastosowana pojemność separująca wraz z rezystancją wewnętrzną karty dźwiękowej pozwalała na swobodną obserwację sygnałów już od paru Hz. W przypadku nadmiernego ograniczania od dołu pasma karty dźwiękowej wystarczy zwiększyć wartość pojemności kondensatora separującego składającego stałą w karcie dźwiękowej, aby poszerzyć pasmo od strony niższych częstotliwości. W Internecie opisanych jest wiele ciekawych eksperymentów z odbiorem sygnałów wolnozmiennych. W przedstawionym układzie, z bardzo podobnymi rezultatami, wykorzystano zarówno optoizolatory IL300, jak i LOC110 – układy te można stosować zamiennie, gdyż posiadają taki sam rozkład wyprowadzeń i podobne parametry. Szczegóły dotyczące stosowania tych ciekawych elementów można znaleźć w ich kartach aplikacyjnych. Schemat montażowy modułu zaprezentowano na **rysunku 20**, a zmontowany układ widać na **fotografii 21**. Układ poprawnie zmontowany ze sprawdzonych elementów powinien zadziałać od pierwszego włączenia i wymaga tylko jednej prostej regulacji.

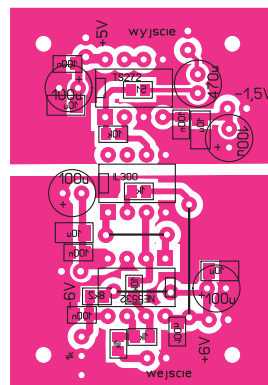
### Obudowa i połączenia modułów

Wszystkie układy należy umieścić w obudowie metalowej, a wejścia i wyjścia sygnałowe powinno się wyprowadzić na płytę czołową urządzenia. Konfigurację układu wybiera się, łącząc odpowiednie wejścia i wyjścia między sobą za pomocą ekranowanych przewodów połączeń z wtyczkami typu „cinch”. Złącza te, nawet gorszej jakości, dają znacznie lepsze połączenie niż złącza typu „mini jack”. Zastosowane

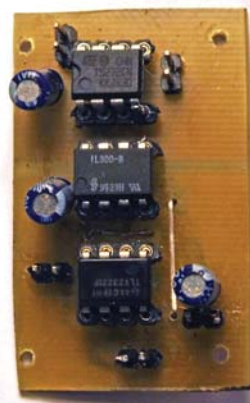
w układzie złącze mini jack stereo służy jedynie do podłączenia sygnału różnicowego z anteny magnetycznej. Rozwiązanie takie pozwala na elastyczną realizację połączeń między blokami układowymi oraz ułatwia szybki wybór najlepszej konfiguracji połączeń między poszczególnymi modułami. Autor zwykle łączy układy w następującej kolejności: wybrany odbiornik, wybrany filtr dolnoprzepustowy, filtr notch. Wybrane wyjście należy podłączyć do karty dźwiękowej komputera przez transformator separujący m.c.z. (tzw. transformator liniowy, ale można spróbować wykorzystać transformator mikrofonowy). Pasma przenoszenia zastosowanego transformatora musi zapewniać przeniesienie najniższych częstotliwości odbieranych. Transformator ten zmniejsza także wpływ zakłóceń generowanych przez komputer na nasz odbiornik. Zamiast transformatora można wykorzystać opisany optoizolator audio, ma on jednak mniejszą dynamikę. Niewykorzystane wejścia sygnałowe odbiorników powinny zostać zwarte do masy, funkcję zwory może pełnić wtyk typu „cinch”, w którym lutowano bolec wewnętrzny z masą. Potencjometr do regulacji częstotliwości pracy filtru notch wyprowadzono z tyłu obudowy, a to ze względu na brak miejsca na płycie czołowej.

### Karta dźwiękowa i oprogramowanie

Sygnały ELF-VLF dekoduje się za pomocą programów współpracujących z kartą dźwiękową komputera, wykonujących analizę FFT. Ja używam małej zewnętrznej karty dźwiękowej (typu „gwizdek”), podłączonej do portu USB komputera, widocznej na **fotografii 22**, w której oryginalny kondensator sprzęgający zastąpiłem kondensatorem o większej pojemności, zwiększyłem pojemność z 1 do 100uF. Mała pojemność oryginalnie zastosowanego kondensatora ograniczała pasmo karty od strony niskich częstotliwości. Warto z takiej karty usunąć opornik podający zasilanie do mikrofonu elektrytowego (zwykle parę kom). Lepsze parametry mają karty zewnętrzne USB z wejściem liniowym, a nie tylko mikrofonowym lecz są one droższe niż karta typu „gwizdek”.



Rys. 20



Fot. 21

Fot. 22



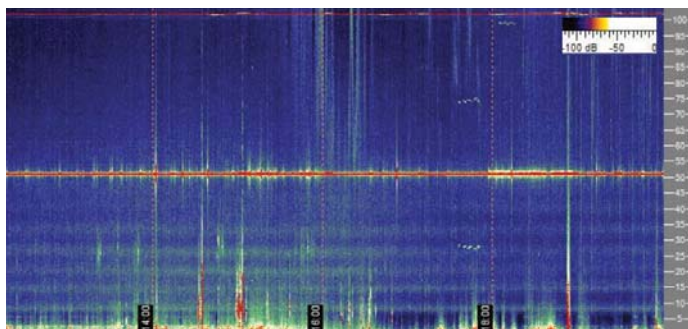
Karta taka na serwisach aukcyjnych kosztuje około 6–7zł i zapewnia lepsze parametry niż karta zintegrowana pracująca w moim netbooku E-Machines 350. Dodatkowo, zastosowanie karty zewnętrznej chroni wejście audio komputera przed ewentualnymi uszkodzeniami. Współczesne karty dźwiękowe USB zazwyczaj nie wymagają żadnych specjalnych sterowników do poprawnej pracy w systemach Windows 7 starter i Windows XP.

### Oprogramowanie

Najlepszym programem pod względem ilości dostępnych opcji do odbioru i analizy sygnałów ELF-VLF jest program SpecLab autorstwa niemieckiego krótkofalowca DL4YHF. Program ten jest całkowicie darmowy i można ściągnąć go ze strony:

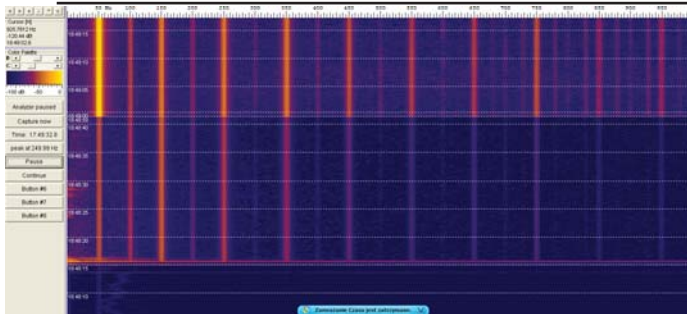
[http://dl4yhf.ssl7.com/speclab/install\\_speclab.zip](http://dl4yhf.ssl7.com/speclab/install_speclab.zip).

Programy Spectrum Lab pokazuje w postaci graficznej tzw. spektrogramu – przykład na **rysunku 23**. O częstotliwości sygnału mówi jego położenie na skali częstotliwości, o momencie wystąpienia – położenie na skali czasu, a o sile sygnału – jego kolor. Po zainstalowaniu programu należy przeprowadzić jego konfigurację, wybierając funkcję **Options**, następnie kolejno zakładki **Audio settings**, **IQ device selection**. W zakładce **Audio input device** należy wskazać kartę dźwiękową, do której podłączono odbiornik. Za pomocą zakładki **Audio output device** wskazujemy kartę, za pomocą której będziemy mogli słuchać odbieranych sygnałów – ja jednak w praktyce zawsze ją wyciszam, gdyż odbierany sygnał nie jest zbyt przyjemny dla ucha. W zakładce **Soundcard sample rate** wybiera się częstotliwość próbkowania karty dźwiękowej (zwykle



Rys. 23





Rys. 24

48 lub 96kHz). Maksymalna częstotliwość odbieranych sygnałów, zgodnie z twierdzeniem Nyquista o próbkowaniu, równa się połowie częstotliwości próbkowania karty dźwiękowej. W zakładce **bit/sample** należy wybrać rozdzielczość bitową zastosowanej karty dźwiękowej (zwykle 16 lub 24 bity), parametr **Decimate input SR by** ustawia się na 1. Zmiany należy zatwierdzić przyciskiem **Apply**. Następnie trzeba wybrać zakładkę **FFT**. Za pomocą opcji **Decimate input SR by (divisor)** możemy zmniejszyć pasmo odbieranych częstotliwości. Na przykład jeśli częstotliwość próbkowania karty wynosi 48kHz, a zastosowaliśmy decymację równą 48, to odpowiada to częstotliwości próbkowania 1 kHz, a maksymalna odbierana częstotliwość będzie wówczas wynosiła 500Hz. Stosując decymację, należy pamiętać o zaznaczeniu opcji **Use anti-alias filter for decimation**. Za pomocą opcji **FFT input size („length”)** wybiera się długość ciągu próbek, która poddana będzie analizie. Zwiększenie liczby próbek powoduje zwiększenie rozdzielczości częstotliwościowej analizatora kosztem wydłużenia obróbki danych. Menu **FFT window function** pozwala wybrać typ okna czasowego (widmowego). Szczególnym i zarazem najprostszym rodzajem okna jest okno prostokątne (ang. *flattop*). Zastosowanie okna innego niż prostokątne pozwala zwiększyć rozdzielczość częstotliwościową analizatora kosztem nieco pogorszonej rozdzielczości amplitudowej. W dolnym oknie programu widoczne są informacje o wpływie zastosowanych parametrów na podstawowe parametry analizatora, tzn. jego rozdzielczość częstotliwościową oraz maksymalną częstotliwość odbieraną. W zakładce **Spectrum (2)** poprzez parametr **Range** ustawia się zakres poziomów odbieranych sygnałów. Program uruchamia i zatrzymuje się tym samym przyciskiem **Start/Stop**. W przypadku trudności z przywróceniem ustawień programu do wartości początkowych należy przejść do opcji **Quick settings** i wybrać **Restore all factory settings**. Zakres częstotliwości pracy odbiornika można zmieniać w oknie **freq** w lewym górnym rogu w polach **min**

i **max** głównego okna programu. Parametrami **Color Palette B** i **C** za pomocą suwaków można modyfikować kolory, jakie są przypisane poszczególnym poziomom sygnałów. Pomaga to uwypuklić subtelne zmiany poziomów sygnałów podczas ich obserwacji i analizy. Na rysunku 23 widzimy obraz z anteny magnetycznej.

Skuteczność działania opisanych układów poprawiających komfort pracy pokazana jest na **rysunku 24**. Na samym dole spektrogramu (rysunek 24) widzimy szumy karty dźwiękowej, nieco wyżej spektrogram otrzymany przez podłączenie do karty dźwiękowej odbiornika z załączonym filtrem dolnoprzepustowym 200Hz i filtrem notch (odbiornik z anteną reagującą na składową elektryczną), a na samej górze spektrogram z tego samego odbiornika, ale bez załączonych filtrów.

## Wykaz elementów

(przy elementach SMD podano wielkość obudowy: 0805 lub 1206)

### Odbiornik wersja I-a

R4	.....	51Ω	0805
R2	.....	2,2kΩ	0805
R1	.....	10kΩ	0805
R3	.....	22kΩ	0805
R5	.....	410MΩ, 5 oporników 82MΩ,	0805,
		montowanych techniką przestrzenną – patrz tekst	
C4	.....	100pF	0805
C3,C7	.....	100nF X7R	0805
C1,C5	.....	10μF/16V ceramiczny	1206
C2,C6	.....	100μF/16V elektrolityczny	przewlekany
U1	.....	TL072	DIP8
Q1, Q2	.....	BC550	

### Odbiornik wersja I-b

R4	.....	51	0805
R2	.....	2,2kΩ	0805
R6	.....	2,2kΩ-47kΩ	0805
R1	.....	10kΩ	0805
R3	.....	22kΩ	0805
R7	.....	1MΩ	0805
R5	.....	10MΩ	0805
C4	.....	100pF	0805
C3, C7	.....	100nF X7R	0805
C1, C5, C8	.....	10μF/16V ceramiczny	1206
C2, C6	.....	100μF/16V elektrolityczny	przewlekany
U1	.....	TL072	DIP8
Q1, Q2	.....	BC550	

### Odbiornik współpracujący z anteną magnetyczną I

R12	.....	0Ω	1206 (zwora)
R1,R4-R7	.....	100Ω	0805
R2,R3,R8-R11	.....	10kΩ	0805
C1,C2	.....	100pF	0805
C3,C4,C8,C9,C15,C16	.....	1nF	0805
C5,C10,C12-14	.....	10nF	0805
C6,C7,C17	.....	10μF/16V ceramiczny	1206
C11,C18	.....	100μF/16V elektrolityczny	przewlekany
L1,L2	.....	10μH	przewlekany
L3,L4	.....	1μH	1206
U1	.....	OPA1632	MSOP8 lub S08
U2	.....	NE5534N	S08

### Odbiornik współpracujący z anteną magnetyczną II

R1	.....	10Ω	obudowa 0805
R4	.....	51Ω	0805
R2,R3	.....	10kΩ	0805
C7	.....	180pF	ceramiczny,0805
C1,C6	.....	100nF	ceramiczny X7R, 0805

C2,C5	.....	100μF/16V	elektrolityczny
C3,C4	.....	ceramiczny 10μF	obudowa 1206 (można zastąpić tantalowym)
IC1	.....	SSM2019	DIL8

### Układ symetryzacji zasilania

R3,R4	.....	3R3	1206
R1,R2,R5,R6	.....	4,7kΩ	0805
C1,C3,C5,C10	.....	100nF	0805
C2,C4,C6,C11	.....	10uF	ceramiczny, 1206
C7,C12	.....	100uF/ 16V	elektrolityczny przewlekany
C8,C9	.....	2200uF/ 16V	elektrolityczny przewlekany
U1	.....	TL071	DIP8
Q1	.....	BC550	
Q2	.....	BC560	
D1,D2	.....	1N4148	obudowa 0805

### Moduł filtrów

R7,R8	.....	2,4kΩ	0805
R5,R6	.....	4,7kΩ	0805
R11	.....	5,6kΩ	0805
R2	.....	6,8kΩ	0805
R1,R4	.....	22kΩ	0805
R3, R9	.....	100kΩ	0805
R10	.....	2,2kΩ	potencjometr liniowy
C11-C13	.....	1nF	MKT
C7,C10	.....	100nF	0805
C1,C3,C4,C9,C14	.....	470nF	MKT
C5,C8	.....	10uF	ceramiczny 1206
C2,C6	.....	100uF/16V	
C15,C16	.....	2200uF/16V	
U1	.....	TL074	DIP14

### Układ optoizolacji sygnałów audio

R7	.....	51	0805
R2,R4,R5	.....	1k	0805
R6	.....	8k2	0805
R1	.....	10k	0805
R3	.....	10k	0805, patrz tekst
P1	.....	1k	wielobrotowy
C1,C4,C7,C10	.....	100nF	ceramiczny X7R, 0805
C3,C5,C8,C12	.....	10μF	ceramiczny, 1206 (można zastąpić tantalowym)
C2,C6,C9,C11	.....	100μF/16V	elektrolityczny
C13	.....	470μF/16V	elektrolityczny
OP1	.....	NE5532	DIP8
OP2	.....	TS272	DIP8
IC1	.....	IL300	DIP8

Płytki drukowane są dostępne w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-3050  
**AVT3054/1 Odbiornik wersja I-a, I-b**  
**AVT3054/2 Odbiornik współpracujący z anteną magnetyczną I**  
**AVT3054/3 Odbiornik współpracujący z anteną magnetyczną II**  
**AVT3054/4 Układ symetryzacji zasilania**  
**AVT3054/5 Moduł filtrów**  
**AVT3054/6 Układ optoizolacji sygnałów audio**



W spektrogramie z załączonymi filtrami poziom sygnałów o niepożądanych częstotliwościach jest mniejszy, ponadto poziom naszego głównego „wroga” sygnału 50Hz jest wyraźnie słabszy. Poziom sygnału 50Hz po zastosowaniu filtru notch jest mniejszy nawet od jego trzeciej harmonicznej. Pomiar ten wykonano specjalnie w pobliżu miasta, aby pokazać, jaką poprawę wnoszą opisane układy. Spektrogramy z dwu opisanych w artykule odbiorników: współpracującego z anteną reagującą na składową elektryczną w wersji I-a i magnetyczną w wersji I-a znajdziecie w artykule *Odbiór fal radiowych ELF-VLF* z września 2011 r. – artykuł ten można znaleźć w Elportalu, wśród materiałów dodatkowych do tego numeru. Bardzo

zachęcam do przeczytania tego tekstu, gdyż zawiera wiele cennych informacji, przydatnych szczególnie dla osób, które chcą rozpocząć przygodę z odbiorem VLF. Spektrogramy, otrzymane za pomocą obu wersji odbiorników reagujących na składową elektryczną, są bardzo podobne do siebie, tak samo jak podobne do siebie są spektrogramy otrzymane z obu wersji odbiorników, reagujących na składową magnetyczną pola elektromagnetycznego.

Na zakończenie chciałbym zachęcić jak najszersze grono Czytelników do wykonania tego układu i wysyłania mi zrzutów ekranowych ze swoich obserwacji.

Zabawa w odbiór VLF może trwać cały rok. Zimą, wczesną wiosną i późną jesienią ze względu na brak burz łatwiej jest odebrać rezonans Shumana czy syg-

nały komunikacji z okrętami podwodnymi. Za to latem możemy bardzo łatwo analizować wyładowania burzowe. Na stronie [www.blitzortung.org/Webpages/index.php](http://www.blitzortung.org/Webpages/index.php) znajdziemy informacje o miejscu występowania burz, dzięki czemu możemy powiązać odbierane sygnały z wyładowaniami atmosferycznymi.

Chciałbym też podziękować Waldkowi 3Z6AEF i Adamowi Sobczykowi SQ5RWQ za cenne uwagi dotyczące tekstu.

Przypominam, że mnóstwo cennych informacji o odbiorze ELF-VLF zawiera strona [www.vlf.it](http://www.vlf.it). Bardzo ciekawą polskojęzyczną stroną poświęconą technice VLF jest strona Mariusza SP9HSQ <https://sites.google.com/site/sp9hsq/home/vlf>.

**Rafał Orodziński**  
sq4avs@gmail.com