

Miernik rezystywności gruntu, część 1

W artykule prezentujemy dość niezwykły układ, stanowiący interesującą alternatywę dla indukcyjnych wykrywaczy obiektów podziemnych. Przy jego pomocy można wykryć nie tylko metalowe pozostałości z dawnych dziejów, lecz także podziemne rowy, kamienie i fragmenty budowli.

Badanie rezystywności gruntu już dawno stało się archeologiczną metodą wykrywania niejednorodności podziemnych. Obiekty archeologiczne odnajduje się często na głębokości około jednego metra. Naturalne zaś obiekty, takie jak warstwy żwiru lub torfu, na znacznie większej głębokości.

Obiekty naturalne i archeologiczne wykrywa się w ten sam sposób. Granice tych pierwszych nie są wyraźne i ostro zarysowane, podczas gdy tych drugich mają wyraźne, kanciaste kształty wytworów rąk ludzkich. Gdy przypominają zarysy budowli, tak prawdopodobnie jest.

Tło historyczne

Technika pomiarów rezystywności była początkowo używana w inżynierii do badania terenów budowy zapór itp. Po raz pierwszy przekonano się do jej stosowania w archeologii w roku 1946. Pierwsze mierniki były zasilane ręcznie, z prądniczki napędzanej korbką i zawierały układ rezystancyjnego mostka pomiarowego. Pomiaru dokonywano przez równoczesne pokręcanie korbki i odczytywanie wyniku na skali

wykalibrowanej w omach. Procedura ta była powolna i nużąca, ponieważ wymagała wykonania całej serii pomiarów na badanym obszarze. Wraz z pojawieniem się tranzystorów działanie archeologicznych mierników rezystywności stało się szybsze.

Konstrukcje pierwszych mierników tranzystorowych przeszły ewolucję od prostych systemów mostków napięcia zmiennego, równoważonych kalibrowanym potencjometrem, do obecnych przyrządów fabrycznych, przystosowanych do gromadzenia wyników w rejestratorze danych i wyświetlających je w formie mapy na ekranie przenośnego komputera.

Przy okazji warto wspomnieć, że pomiary rezystywności zastosowano ostatnio do pomiarów pęknięć metali, a także w medycynie.

Co to jest rezystywność?

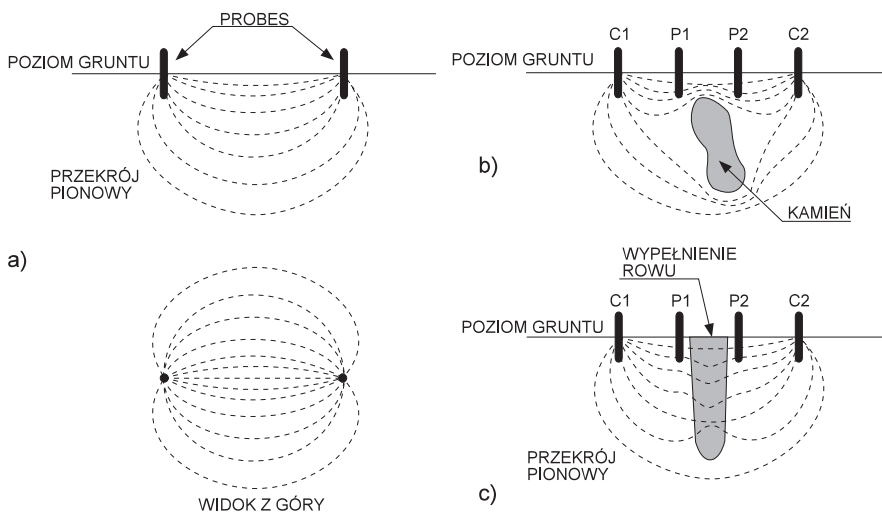
Rezystywność, czyli oporność właściwa, definiuje się jako oporność metra sześciennego substancji, mierzoną pomiędzy przeciwległymi powierzchniami. Jest to zatem znormalizowany sposób porównywania oporności różnych materiałów:

$$\rho = RL/A, \text{ gdzie}$$

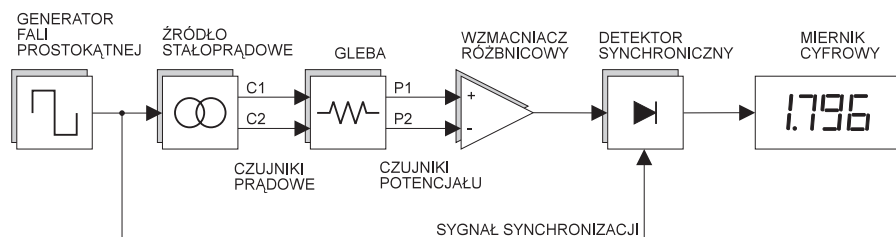
ρ - rezystywność,
 R - oporność materiału wzdłuż jego długości,
 L - długość materiału,
 A - powierzchnia przekroju materiału.

Zasady wykorzystania wyników pomiarów rezystywności gruntu są następujące: rezystywność kamienia, betonu i podobnych materiałów jest stosunkowo wysoka, podczas gdy rezystywność niemal wszystkich gleb jest niska. Często rezystywność niewidocznych już z powierzchni zasypanych rowów i dołów jest niższa od rezystywności otaczającej je gleby.

Wypadkowa rezystywność gle-



Rys. 1. Przepływ prądu pomiędzy sondami: (a) linie sił pola elektrycznego pomiędzy dwoma sondami; (b) konfiguracja Wennera, linie sił pola elektrycznego, gdy pomiędzy sondami znajduje się kamień; (c) konfiguracja Wennera, linie sił pola elektrycznego, gdy pomiędzy sondami znajduje się zamulony rów.



Rys. 2. Schemat blokowy miernika rezystywności gruntu.

by i znajdujących się w niej materiałów jest nazywana rezystywnością pozorną. Gdy mierzy się rezystywność gruntu, w którym gdzieś znajduje się kamienny blok, w miejscu tym pozorna rezystywność jest większa. Podobnie, w poprzek zamulonego rowu jest mniejsza. Zjawisko to zilustrowano na rys. 1.

Jest to więc metoda wykrywania fundamentów budynków, murów, zamulonych rowów, dołów itp. Jednak szereg czynników komplikuje ten obraz. Rezystywność gleby zmienia się w zależności od jej składu, wilgotności i zagęszczenia. Jest więc jasne, że wykonanie w danym miejscu tylko jednego lub dwóch pomiarów jest bezwartościowe i uzyskane informacje będą mało użyteczne. Konieczne jest przeprowadzenie całej serii pomiarów, dokonywanych metodycznie według uprzednio przygotowanego planu.

Do wykonywania pomiarów miernikiem rezystywności jest konieczny system sond, które wbija się w ziemię na głębokość około 250mm. Badania rezystywnościowe mogą więc być uważane za technikę nieniszczącą, która nie szkodzi pozostałościom archeologicznym - oczywiście o ile nie zacznie się kopać samemu, aby potwierdzić wyniki swoich pomiarów!

Trzeba tu podkreślić, że kopanie w miejscach potencjalnych znalezisk archeologicznych jest dozwolone jedynie wykwalifikowanym archeologom.

Kilka problemów

Dlaczego nie można by dokonywać pomiarów rezystywności gleby przy pomocy omomierza znajdującego się w zasięgu ręki każdego elektronika? Przecież prosty multimetr na odpowiednim zakresie omomierza byłby najtańszym przyrządem do takich pomiarów.

Ale pomiary multimetrem by-

łyby zakłócone następującymi efektami:

- błądzącymi w ziemi prądami sieci energetycznej 50Hz;
- efektem ogniwa, wywoływanym chemicznym oddziaływaniem na sondy kwasów czy zasad znajdujących się w glebie;
- efektem elektrolizy wywołanym przez prąd przepływający przez glebę.

Dwa pierwsze punkty są dość oczywiste, ale trzeciemu trzeba poświęcić kilka słów wyjaśnienia.

Efekt elektrolizy spowoduje stopniowy wzrost oporności styków pomiędzy sondami i glebą, wywołując stopniowy wzrost wyników pomiarów multimetrem. Powiększanie się oporności styków jest spowodowane warstewką gazów wydzielających się na sondach. Pochodzą one z elektrolitycznego rozkładu na tlen i wodór wody zawartej w glebie, wywołanego przepływem prądu pomiarowego. Spróbuj wykonać następujące doświadczenie:

Przyłącz multimetr na zakresie kΩ do dwóch sond wbitych w ziemię na około 200mm w odległości około 500mm od siebie. Tymi sondami mogą być kawałki drutu spawalniczego, rurki metalowe itp. Włącz multimetr i zapisuj wyniki pomiarów w funkcji czasu. Spójrz na tabelę 1, zawierającą wyniki takich pomiarów. Dowodzi ona, że odczyty rosną nie osiągając stabilnej wartości. Jest to przykład efektu elektrolitycznego prądu pomiarowego.

Widać, że w wyniku odwrócenia końcówek otrzymuje się całkowicie inne wyniki. Jest to skutek sumowania się efektu elektrolitycznego z efektem ogniwa.

Po przełączeniu multimetru na zakres miliwoltów napięcia stałego, odczyta się napięcie np. 150mV, spowodowane efektem ogniwa. Przełączenie multimetru na zakres miliwoltów napięcia zmiennego wykaże np. 3mV czy 4mV,

wykazujące pochodzący z sieci energetycznej prąd błądzący. Po stwierdzeniu tych komplikacji można pomyśleć o sposobach ich przewyżczenia.

Wymagania systemu

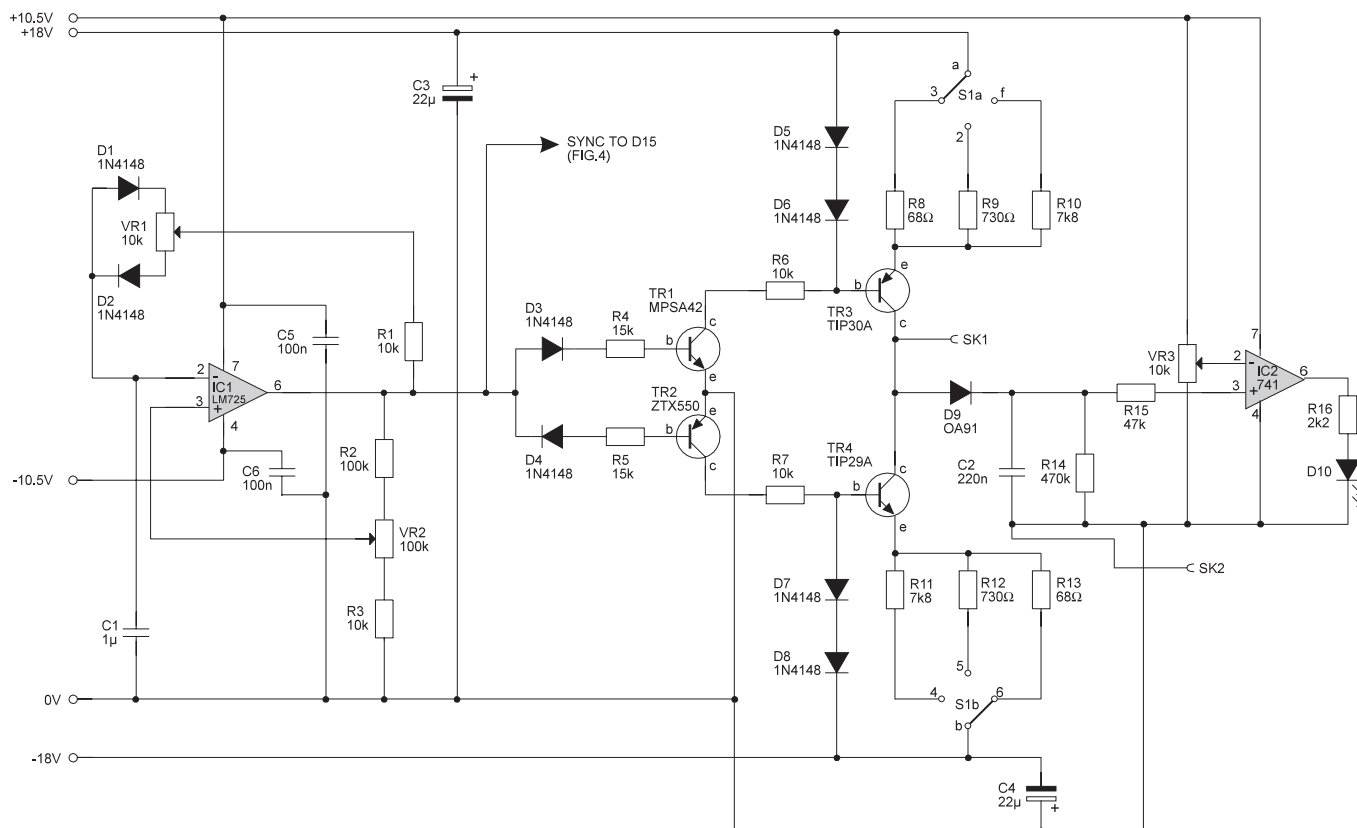
Do dostarczania prądu do gleby jest potrzebny generator fali prostokątnej. Jego częstotliwość nie może być zbyt niska, aby ograniczyć wpływ efektu elektrolitycznego. Nie może być ona jednak być zbyt wysoka ze względu na efekt indukcyjności gruntu. Częstotliwość nie może także być wielokrotnością 50Hz, gdyż mogłoby zostać zakłócone działanie synchronicznego prostownika w stopniu wyjściowym, służącego do eliminacji szkodliwych sygnałów 50Hz. Autor wybrał 137Hz.

Oscylator służy do pobudzania generatora dostarczającego do gruntu prąd o stałej amplitudzie, co pozwala na eliminację jednej zmiennej. Prąd ten jest doprowadzany do dwóch sond (prądowych), nazwanych sondami C1 i C2. Powstałe w gruncie napięcie jest odbierane przez drugą parę sond (napięciowych), nazwanych sondami P1 i P2. Jest to napięcie "swobodne", co oznacza, że żadna z tych sond nie jest połączona z punktem 0V przyrządu.

Skutkiem tego jest konieczność użycia wzmacniacza różnicowego. Jego impedancja wejściowa powinna być możliwie największa, aby oporności styków sond P1 i P2 z glebą można było pominąć.

Sygnał wyjściowy wzmacniacza doprowadza się do synchronicznego prostownika, który prostuje tylko sygnały będące w fazie

czas [sek/min]	oporność [kΩ]	oporność (odwrócone końcówki) [kΩ]
0	6,36	9,66
10	6,66	10,00
20	6,76	10,15
30	6,81	10,28
40	6,87	10,34
50	6,91	10,40
1,0	6,95	10,44
1,5	7,06	10,53
2,0	7,17	10,57
2,5	7,23	10,59
3,0	7,23	10,63
3,5	7,30	10,66
4,0	7,30	10,69
4,5	7,28	10,70
5,0	7,36	10,72



Rys. 3. Schemat generatora prądu.

z sygnałem oscylatora. Wyprostowany sygnał zostaje dostarczony do multimetru cyfrowego zapewniającego dogodny odczyt. Zasadę działania przyrządu wyjaśnia schemat blokowy na rys. 2.

Żaden mierzony sześcián ziemi nie jest izolowany. Zatem przyległa ziemia także uczestniczy w przewodzeniu prądu. Prąd przepływający pomiędzy wbitymi w ziemię sondami ma tendencję do rozszerzania swojej drogi we wszelkich kierunkach, a jego wartość maleje stopniowo w miarę oddalania się od najkrótszej linii łączącej sondy (spójrz na rys. 1a - większe odległości między liniami).

Obraz gęstości prądu w glebie jest analogiczny do obrazu ilustrującego rozkład pola magnetycznego wokół sztabki magnesu, a otrzymywanego na papierze przy pomocy rozsypanych opiłków żelaza. Taki rozkład gęstości prądu jest skutkiem odpychania się od siebie elektronów, mających jednonimienne ładunki elektryczne.

Wprost do elektrod wprowadzających prąd zmienny do gleby można by przyłączyć miernik napięcia zmiennego. Z otrzymanych wyników można by obliczyć opor-

ność z prawa Ohma:

$$R = U/I.$$

Metoda ta jest skuteczna, ale obarczona istotną wadą. Takim pomiarem jest objęta półkula gruntu. W przypadku tylko dwóch sond mierzy się przede wszystkim spadek napięcia wywołany przez prąd płynący po powierzchni gruntu. Jeżeli użyje się dwóch dodatkowych, oddzielnych sond, przeznaczonych tylko do pomiaru napięcia, to otrzyma się system elektrod bardziej uczulony na głębokość.

Mierzona różnica potencjałów dotyczy półkuli gruntu, a nie sześcianu i zależy od aktualnej konfiguracji sond. Wynikiem pomiaru nie jest więc dokładnie biorąc miernik rezystywność. Ponieważ jednak w tym wypadku wystarczają wyniki względne, rzeczywista rezystywność gruntu nie musi być obliczana.

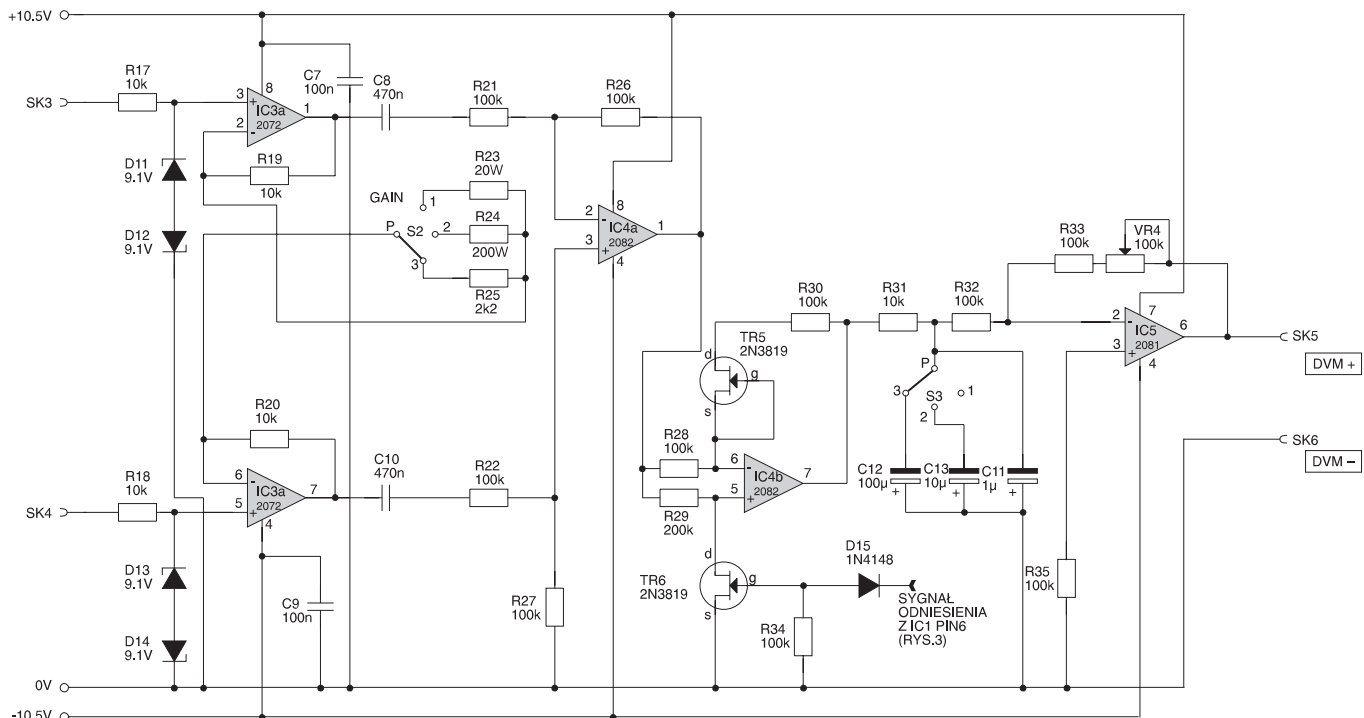
Opis układu

Po zaznajomieniu się z odrobiną teorii można zejść na ziemię i opisać układ prostego miernika rezystywności gruntu. Schemat jego pierwszej części - generatora prądu zmiennego - przedstawia rys. 3.

Wzmacniacz operacyjny IC1 oraz związane z nim elementy tworzą oscylator symetrycznej względem punktu 0V fali prostokątnej o częstotliwości 137Hz. Falę tę otrzymuje się z wyjścia 6 IC1, a jej amplituda jest nieco mniejsza od napięć zasilających $\pm 10,5V$.

Symetrię fali można dokładnie regulować potencjometrem VR1 połączonym z diodami D1 i D2. Częstotliwość natomiast da się precyzyjnie doregulować potencjometrem VR2. Kondensator C1 wchodzi w skład obwodu RC oscylatora. Oczywiście, musi to być kondensator niespolaryzowany, np. poliestrowy. Nie może to być kondensator elektrolityczny, ponieważ prąd upływu tych kondensatorów zmienia się z temperaturą, co mogłoby spowodować dryfowanie częstotliwości od przyjętej wartości.

Sygnał z wyjścia 6 IC1 dochodzi do układu przełączającego TR1, TR2, który włącza raz dodatnią, a raz ujemną część bipolarnego generatora prądu. Dodatni prąd jest generowany przez TR3 wraz z diodami D5 i D6 i wybierany przełącznikiem rezystorami obciążenia R8..R10. Podobnie,



Rys. 4. Schemat różnicowego wzmacniacza wejściowego, synchronicznego prostownika i wzmacniacza napięcia stałego.

ujemny prąd jest generowany przez TR4, D7 i D8 wraz z rezystorami R11..R13. Rezystory emiterowe wybiera się podwójnym, trójpozycyjnym przełącznikiem S1. Prąd jest odbierany bezpośrednio z kolektorów TR3 i TR4 przez gniazdko SK1. Natężenie prądu wyjściowego wynosi 0,1mA, 1mA i 10mA zależnie od wybrania jednej z trzech kolejnych pozycji przełącznika.

Natężenie dostarczanego prądu jest mierzone przez układ wzmacniacza operacyjnego IC2, będącego detektorem poziomu napięcia. Napięcie to jest proporcjonalne do prądu pobieranego z SK1.

Dioda D9, rezystor R14 i kondensator C2 tworzą prostownik z obwodem wygładzającym. Wzmacniacz operacyjny IC2 jest skonfigurowany jako komparator z dostarczającym napięcia odniesienia potencjometrem VR3.

Gdy napięcie na wyjściu prądowym osiąga zbyt wysoką wartość, co oznacza, że obciążenie generatora prądu jest za duże, zaczyna świecić LED D10. Sygnalizuje to błędny odczyt, ponieważ do dostarczenia wymaganego prądu napięcie jest zbyt małe. Należy wtedy przełączyć przełącznik S1 na mniejsze natężenie prądu, czyli większą oporność obciążenia.

Spadek napięcia, wywołany przez prąd płynący w ziemi, jest odbierany przez sondy P1 i P2, które dostarczają sygnał do wzmacniacza różnicowego. Składa się on z IC3a, IC3b, IC4a i IC4b, a jest przedstawiony na rys. 4.

Diody Zenera D11..D14 zabezpieczają wzmacniacz IC3 przed przesterowaniem. Są to diody 9,1V, zatem powyżej tego napięcia któraś z diod przewodzi, ograniczając napięcie wejściowe wzmacniacza.

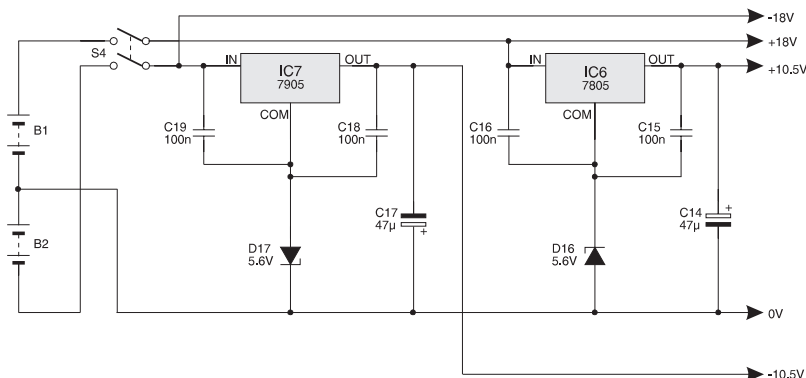
Wzmocnienie wzmacniacza dobiera się przełącznikiem S2 przez wybranie jednego z trzech rezystorów, R23..R25. Wzmocnienie to można obliczyć z poniższego wzoru:

$$K = 1 + 2 \cdot 10000 / R23..R25$$

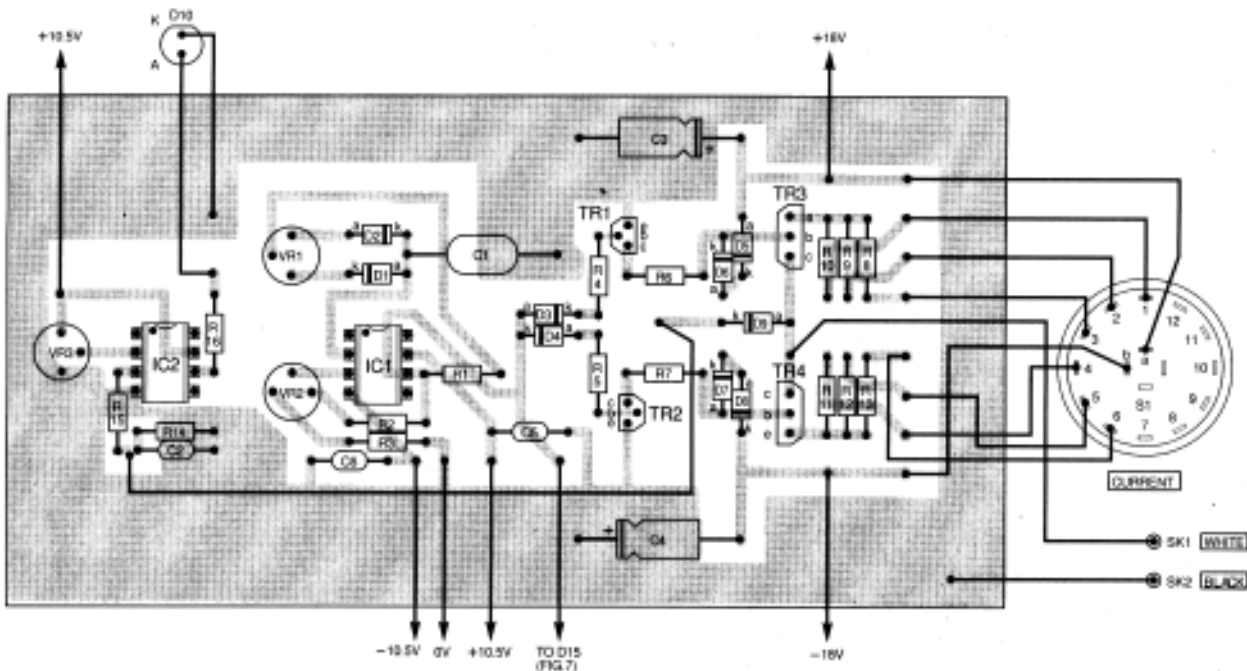
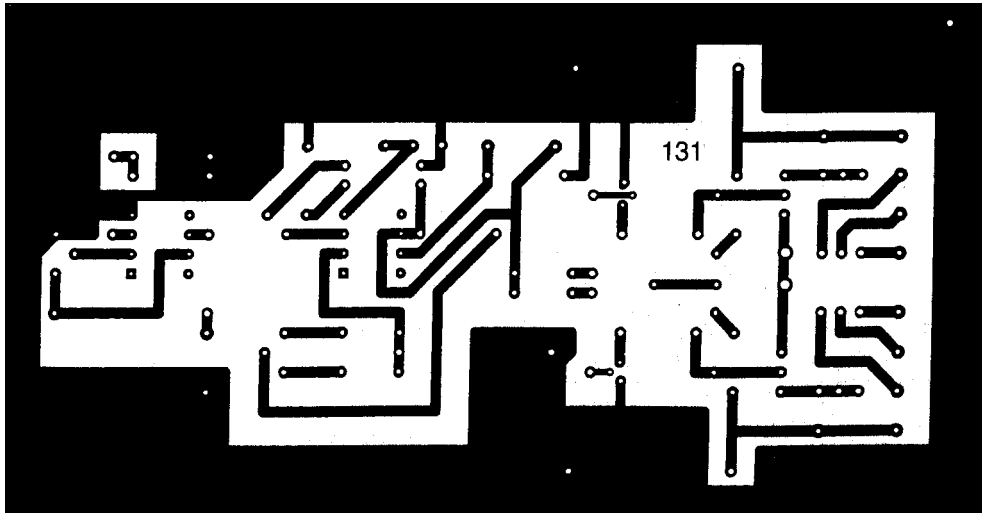
Rezystory zostały tak wybrane, aby wzmocnienie wynosiło 10, 100 lub 1000. Wzmocniony sygnał przechodzi do IC4b, który działa jako synchroniczny prostownik. Przez diodę D15 otrzymuje on sygnał odniesienia, brany z wyjścia 6 IC1 (rys. 3). Gdy na katodzie D15 jest napięcie dodatnie, to na bramce (g) tranzystora polowego (FET) TR6 jest napięcie 0V, a więc przewodzi on i wejście 5 IC4b jest zwarte z masą.

IC4b działa więc jako wzmacniacz odwracający o wzmocnieniu równym - 1. Rezystor R29 obciąża wyjście 1 IC4a, ale jego impedancja wyjściowa jest znacznie mniejsza od tej oporności, więc obciążenie jest pomijalne.

Gdy katoda D15 znajdzie się pod napięciem ujemnym, napięcie



Rys. 5. Schemat zasilacza.



Rys. 6. Rozkład ścieżek na płytce drukowanej generatora prądu i rozmieszczenie na niej elementów.

bramki TR6 wynosi około -10V i impedancja kanału źródło-dren tego FET-a staje się tak wysoka, że można ją uznać za przerwę. IC4b staje się więc nieodwracającym wzmacniaczem o wzmocnieniu równym +1. Jego wzmocnienie wyznaczają oporności R28 i R30. FET TR5 w gałęzi sprzężenia zwrotnego przeciwdziała temperaturowemu pełzaniu wzmocnienia.

Gdy napięcie sterujące prostownik synchronizowany (przez D15) jest dodatnie, amplituda sygnału wyjściowego będzie taka sama jak sygnału wejściowego, ale jego polaryzacja będzie odwrotna. Gdy napięcie sterujące jest ujemne, sygnał wyjściowy będzie także

ujemny, a amplituda nadal taka sama jak sygnału wejściowego.

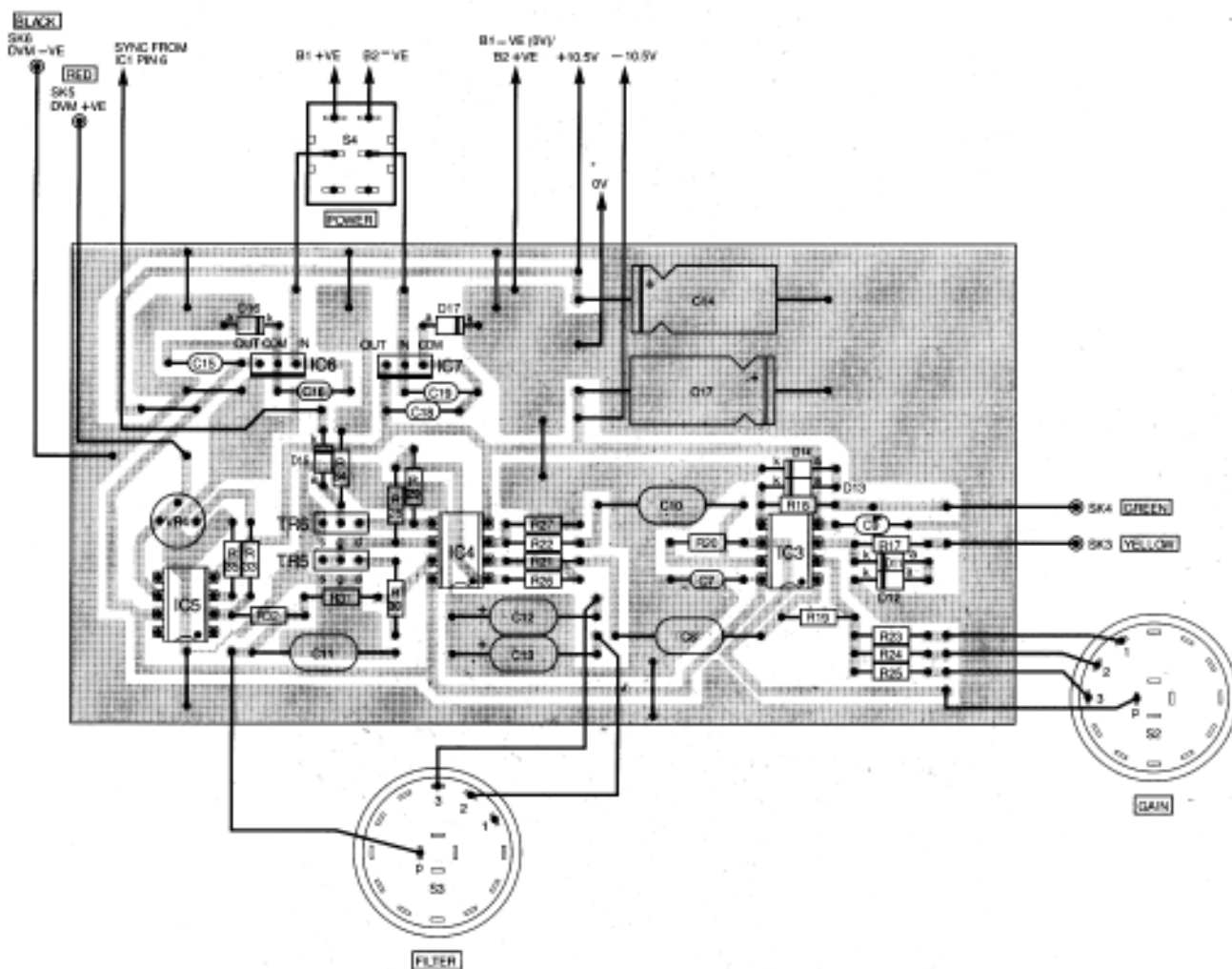
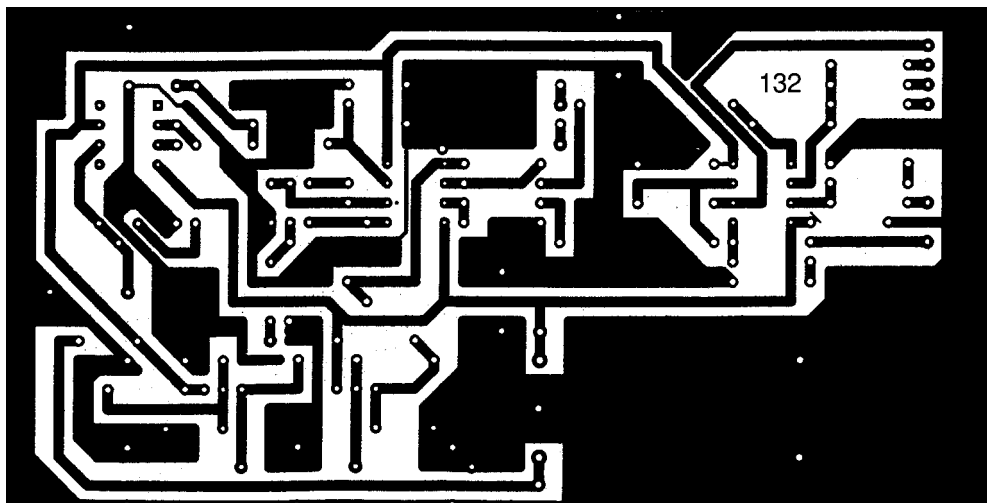
Wyprostowane napięcie z wyjścia 7 IC4b będzie zatem zawsze ujemnym napięciem stałym, na które zostaną nałożone wszystkie sygnały zmienne, nie będące w fazie z napięciem oscylatora. Napięcie z wyjścia 7 IC4b przechodzi przez filtr dolnoprzepustowy, złożony z rezystorów R31 i R32 oraz kondensatorów C11..C13, który usuwa większość niepożądanych sygnałów zmiennych. C12 i C13 mogą zostać włączone lub wyłączone za pomocą S3, co pozwala zmieniać stałą czasową filtra i skuteczność filtracji.

Jednak zwiększanie skuteczności przez zwiększanie pojemności

zwiększa bezwładność pomiaru napięcia. Zastosowane wartości pozwalają dobrać kompromisowo optymalny filtr, w zależności od lokalnych zakłóceń.

Napięcie wyjściowe wzmacniacza napięcia stałego IC5 jest przez gniazdka SK5 i SK6 wyprowadzone do woltomierza cyfrowego (DVM). Nadaje się do tego celu podręczny multimetr cyfrowy z przewodami połączeniowymi o długości około 500mm. W razie potrzeby można w obudowie miernika rezystywności wmontować cyfrowy miernik tablicowy. Budowa specjalnego cyfrowego miernika nie wydaje się opłacalna.

Wymagany miernik winien mieć zakresy o czułości od 100mV do 10V.



Rys. 7. Rozkład ścieżek na płytce drukowanej wzmacniacza i prostownika oraz rozmieszczenie na niej elementów.

Zasilacz

Jak widać na rys. 5, miernik jest zasilany przez dwie baterie dowolnego typu, B1 i B2, które mogą dostarczyć po 18V przy poborze kilku miliamperów. Akumulatorki NiCd ze starego radio-

odbiornika będą idealne, a po dwie baterie PP9 dla B1 i B2 będą równie dobre.

Napięcia te są obniżane przez dwa stabilizatory IC7 i IC6 z diodami Zenera D17 i D16 do -10,5V i +10,5V.

Montaż

Układ montuje się na dwóch płytkach drukowanych, przedstawionych na rys. 6 i 7. Użycie podstawek dla wszystkich układów scalonych jest godne polecenia. Montaż należy zacząć od

rezystorów, diod i kondensatorów, po czym wmontować tranzystory i układy scalone. Trzeba zwrócić uwagę na ich ukierunkowanie.

Następnie należy przygotować odpowiednich rozmiarów obudowę, wywiercić w niej otwory na gniazdko, przełączniki i do mocowania płytek drukowanych. Płytki drukowane przymocowuje się do obudowy wkrętami M3 z nakrętkami, albo za pomocą słupków montażowych.

Prototyp układu został zmontowany na uniwersalnych płytach drukowanych, które umieszczono w trzech małych obudowach plastikowych, o wymiarach 60mm x 110mm x 30mm każda, skręconych razem śrubami M3 z nakrętkami.

Jednakże dla płytek pokazanych na rys. 6 i 7 wystarczy tylko jedna obudowa o minimalnych wymiarach 140mm x 70mm x 60mm. Trzeba dokładnie sprawdzić rozmiary zmontowanego układu przed zakupem obudowy, ponieważ wymiary niektórych podzespołów mogą się różnić. Praktyczna będzie obudowa plastikowa z gumową uszczelką pod pokrywą, zmniejszającą ryzyko zamknięcia układu w czasie prac polowych.

Robert Beck, EwPE

Artykuł publikujemy na podstawie umowy z redakcją miesięcznika „Everyday with Practical Electronics“.

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

R1, R3, R6, R7, R17..R20, R31: 10k Ω

R2, R21, R22, R26..R28, R30, R32..R35: 100k Ω

R4, R5: 15k Ω

R8, R13: 68 Ω

R9, R12: 730 Ω

R10, R11: 7,8k Ω

R14: 470k Ω

R15: 47k Ω

R16, R25: 2,2k Ω

R23: 20 Ω

R24: 200 Ω

R29: 200k Ω

VR1, VR3: 10k Ω potencjometr montażowy, poziomy

VR2, VR4: 100k Ω potencjometr montażowy, poziomy

Kondensatory

C1: 1 μ F, poliestrowy, metalizowany

C2: 220nF/25V, dyskowy, ceramiczny

C3, C4: 22 μ F/63V, leżący

C5..C7, C9, C15, C16, C18, C19: 100nF, ceramiczny

C8, C10: 470nF, poliestrowy

C11: 1 μ F/35V, tantalowy

C12: 100 μ F/35V, leżący

C13: 10 μ F/35V, leżący

C14, C17: 47 μ F/35V, leżący

Półprzewodniki

D1..D8, D15: 1N4148, krzemowa detekcyjna

D9: OA91, germanowa, detekcyjna

D10: czerwona LED

D11..D14: BZY88C9V1, dioda Zenera 500mV

D16, D17: BZY88C5V6, dioda Zenera 500mV

TR1: MPSA42

TR2: ZTX550

TR3: TIP30A mocy

TR4: TIP29A mocy

TR5, TR6: 2N3819, FET n-kanalowy

IC1: LM725, wzm. operacyjny

IC2: 741, wzm. operacyjny

IC3: 2072, podwójny wzm. operacyjny

IC4: 2082, podwójny wzm. operacyjny

IC5: 2081, wzm. operacyjny

IC6: 7805, stabilizator +5V/1A

IC7: 7905, stabilizator -5V/1A

Różne

B1, B2: bateria 18V (zob. tekst)

S1..S3: przełącznik obrotowy trójpozycyjny, czteroobwodowy

S4: wyłącznik dwuobwodowy

SK1: gniazdko 4mm, białe

SK2,SK6: gniazdko 4mm, czarne

SK3: gniazdko 4mm, żółte

SK4: gniazdko 4mm, zielone

SK5: gniazdko 4mm, czerwone

plytka drukowana (gen. prądu)

plytka drukowana (wzm., zasilacz)

5 podstawek 8-stykowych

wtyczki 4mm

3 pokrętła

obudowa

materiał na sondy