

Prosty Theremin

Wyberzmy się w podróż „Z powrotem w przeszłość”, aby odkryć fascynujący świat muzyki i magii, z którym połączy nas niezwykle instrument muzyczny - Theremin.

Leon Theremin był pierwszym popularyzatorem muzyki elektronicznej. Swego dzieła dokonał za pomocą elektronicznego instrumentu muzycznego, który samodzielnie zbudował i który przez to otrzymał nazwę Theremin. Konstrukcja tego instrumentu znalazła swój pierwowzór w twierdzeniu Artura C. Clarka, który powiedział, że dobra technologia powinna pojawiać się jak czary, grało się bowiem na nim bez fizycznego kontaktu z instrumentem. Thereminiści w specyficzny sposób poruszali rękoma wokół anten, sterując wysokością tonu i natężeniem dźwięku.

Dla zachowania stabilności tonu była niezbędna nieruchoma pozycja ciała, a to wzmacniało efekt teatralności i dodawało tajemniczości. Wraz z niesamowitością brzmienia, dziwność tego instrumentu wprowadziła Theremin do wielu filmów science fiction lat 50-tych, takich jak na przykład „Dzień, w którym zatrzymała się Ziemia”.

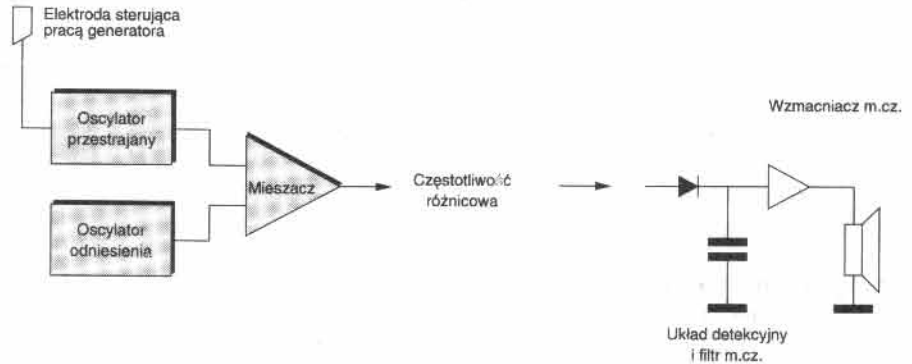
Theremin - koniec legendy

Theremin długi czas był otoczony tajemnicą i legendą i to odgrywało dużą rolę w telewizyjnym programie dokumentalnym w Channel 4, nadanym wkrótce po śmierci Theremina w roku 1994. Jednakże zadaniem takich pism technicznych jak EPE jest demystyfikacja urządzeń technicznych i tłumaczenie ich działania.

Mówi się, że w elektronice wiele odkryć zrobiono wtedy, gdy coś źle działało. Sprawdza się to w stosunku do Theremina, ponieważ zasadę jego działania można często doświadczyć w praktyce jako jedną z form niestabilności. Klasycznym tego przykładem jest radiodiodnik, w którym odbior-

rowi programu towarzyszy głośny gwizd. Poruszanie pokrętkiem strojenia zmienia zwykle wysokość gwizdu. Skutkiem połączenia tego zjawiska z innym znanym efektem, pojemności dłoni, jest zależność wysokości gwizdu od poruszania dłonią w pobliżu odbiornika.

Jest bardzo prawdopodobne, że to właśnie tak rozpowszechnione w latach 20-tych stare radiodiodniki reakcyjne, bardzo podatne na te efekty, zainspirowały Theremina do ich zanalizowania



Rys. 1. Schemat blokowy prostego Theremina.

i wykorzystania do stworzenia instrumentu muzycznego. Nie ma więc w tym żadnej tajemnicy, i w gruncie rzeczy Theremin jest gloryfikacją pojemnościomierza akustycznego!

Zasada działania

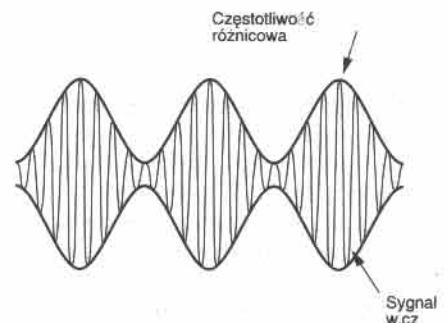
Głównymi podzespołami wszystkich Thereminów są dwa generatory wielkiej i niemal identycznej częstotliwości, zwykle w granicach od 0,2MHz do 2MHz. Częstotliwość jednego z nich jest stała, natomiast drugi generator jest połączony z przewodnikiem, tworzącym zmienną pojemność z ręką grającego. W miarę ruchów jego dłoni, pojemność ta ulega minimalnej zmianie (rzędu ułamka pikofarada), zmieniając w odpowiednio małym stopniu częstotliwość generatora.

Częstotliwości generatorów zostają zmieszane w stopniu mieszającym, jak pokazuje schemat na rys. 1, w wyniku czego powstaje częstotliwość zdudnienia, pokaza-

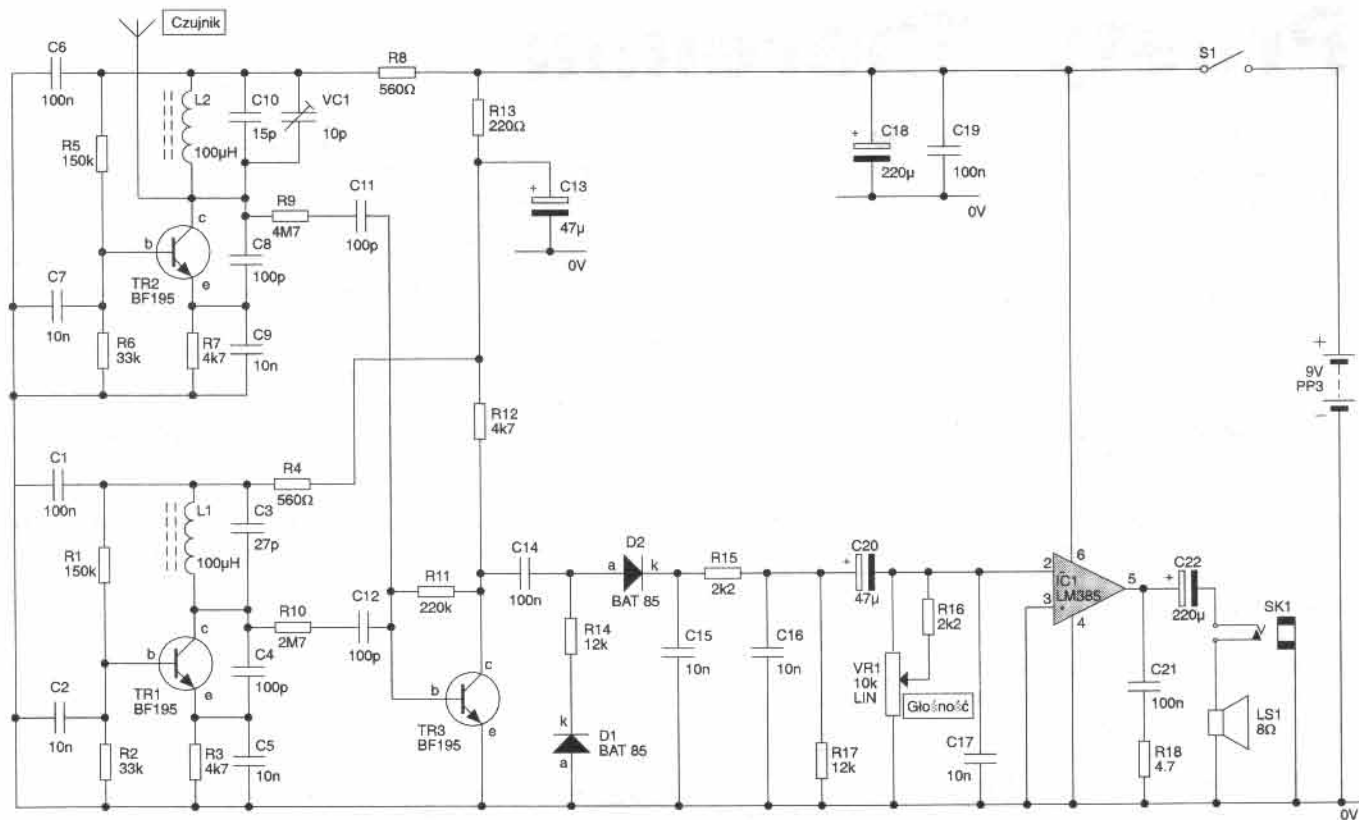
na na rys. 2. Obie częstotliwości pierwotne różnią się tak mało, że częstotliwość dudnień mieści się w zakresie audio.

Cała sztuczka polega na tym, że dzięki wysokiej częstotliwości obu generatorów, bardzo mała zmiana częstotliwości wywołuje dużą różnicę częstotliwości dudnienia, a zatem instrument jest czuły, a zakres wysokości jego tonów szeroki. Sygnał wyjściowy mieszacza zawiera wiele składowych wielkiej częstotliwości, podobnie jak sygnał radiowy z mo-

dulacją amplitudy. Dla otrzymania czystego sygnału audio musi więc podlegać detekcji i filtracji. Jeżeli składowe wysokiej częstotliwości nie zostaną usunięte, może nastąpić przesterowanie stopnia wyjściowego wzmacniacza audio, a składowe te mogą zostać wypromieniowane z przewodów wyjściowych, wywołując niestabilność.



Rys. 2. Sygnał o częstotliwości dudnień na wyjściu mieszacza.



Rys. 3. Schemat prostego Theremina.

Oryginalne Thereminy

Oryginalne Thereminy, produkowane w latach 30-tych przez RCA, były bardzo dużymi lampowymi instrumentami w drewnianej obudowie, z pionowym przewodnikiem do sterowania wysokością tonu i poziomą pętlą do regulacji głośności. (Proste Thereminy, tak jak opisywany, nie są zazwyczaj wyposażone w przewodnik do regulacji głośności.) Niecodzienny był regulator głośności RCA, o ujemnej charakterystyce sterowania, polegającej na tym, że żaden ton nie mógł być wysłany, dopóki grający nie wycofał ręki.

W owych czasach nie było wzmacniaczy sterowanych napięciem, jedynym rozwiązaniem było zmienianie jasności świecenia bezpośrednio żarzonych katod lamp. Katody te były żarzone prądem wielkiej częstotliwości oscylatora, który można było tłumić za pomocą sterującego przewodnika.

Oryginalne Thereminy były bardzo zaawansowanymi konstrukcjami elektronicznymi, o doskonałej stabilności i szerokim zakresie częstotliwości. Były często używane razem z orkiestrą i można je było uważać za prawdziwe instru-

menty koncertowe. Odbija się to oczywiście wraz z ich rzadkością na cenie, która wynosi około 12 000GBP.

Prosty Theremin

Przedstawiany układ jest tańszy od modelu RCA o 11980GBP, i zagrać na nim melodię jest trudniej, ponieważ jego zakres jest węższy, ale po połączeniu z głośnikiem o dobrej charakterystyce basowej i jakimiś układami obróbki dźwięku, wyniki są całkiem niezłe.

Osiągnięcie porównywalnej z oryginałem szerokości zakresu wymaga użycia drogich, specjalnie wykonanych cewek, podczas gdy w tym układzie użyto zwykłych, łatwych do nabycia, cewek 100mH.

Opis układu

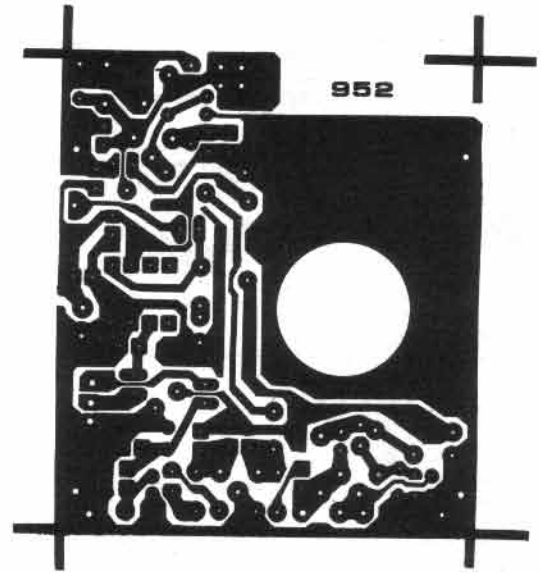
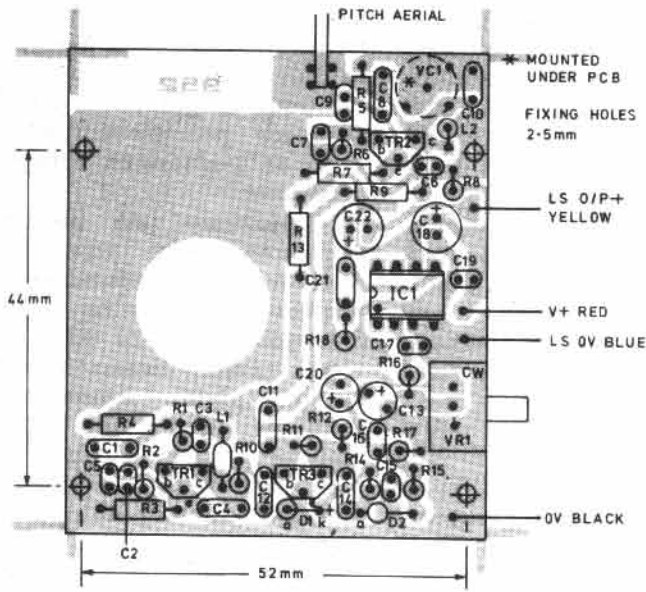
Kompletny schemat prostego Theremina jest pokazany na rys. 3. Oba oscylatory działają w układzie Colpittsa, w którym użycie dzielnika pojemnościowego pozwala uniknąć konieczności stosowania cewki z odczepem. Zastosowano więc zwykle cewki ze sklepu.

Częstotliwość generatora usta-

lonej częstotliwości, w którym użyto tranzystora TR1, wynosi około 1,33MHz. Generator zmiennej częstotliwości, z tranzystorem TR2, jest połączony z anteną (jest ona pod dodatnim napięciem, ponieważ przez cewkę L2 przepływa prąd). Dostosowanie układu do otoczenia umożliwia trymer VC1.

Sygnaly wyjściowe obu generatorów są mieszane przez TR3. Rezystory o dużej oporności R9 i R10 zapobiegają wzajemnemu blokowaniu się generatorów na niskiej częstotliwości. Oporność R10 jest prawie dwukrotnie niższa od oporności R9, aby wartość chwilowa sygnału wyjściowego nie spadała do zera. Zapewnia to pewien minimalny poziom częstotliwości nośnej, redukujący zniekształcenia powstające w detektorze.

Mieszacz jest prostym stopniem o wspólnym emiterze z kolektorowym napięciem polaryzującym. W razie użycia innego tranzystora może okazać się konieczna zmiana oporności R11 w celu zminimalizowania zniekształceń. Mieszacz został odblokowany obwodem R13, C13 w celu ochrony przed oscylacjami małej częstot-



Rys. 4. Mozaika ścieżek płytki drukowanej prostego Theremina i rozmieszczenie na niej elementów. Średnica otworu na głośnik może wymagać powiększenia w celu dostosowania do użytego głośnika.

liwości. Oba generatory mają swoje ceramiczne kondensatory blokujące, C1 i C6.

Signal wyjściowy mieszcza jest demodulowany przez diodę D2. Kondensator C14 odcina składową stałą napięcia kolektora TR3. Dioda D1 przeciwdziała gromadzeniu się ładunku na C14. Pierwszy stopień filtracji wielkiej

częstotliwości zapewnia kondensator C15, a drugi stopień tworzy obwód R15, C16 przed rezystorem obciążenia R17. Kondensator C20 oddziela od wzmacniacza napięcie stałe. Regulator głośności nie typowo może być liniowy, chociaż logarytmiczny zapewnia płynniejszą regulację przy niskich poziomach.

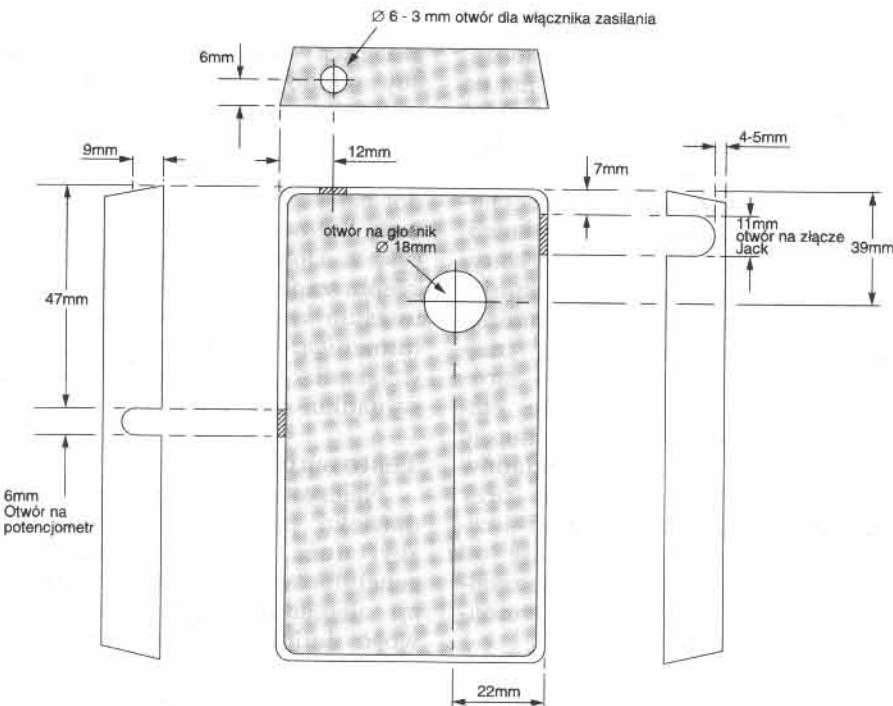
Ostatni stopień filtru R16, C17 łączy się już bezpośrednio ze wzmacniaczem mocy, układem scalonym LM386. Wzmacniacz ten został wybrany z powodu jego najmniejszej skłonności do oscylacji wielkiej częstotliwości spośród monolitycznych wzmacniaczy mocy i wystarczającej mocy wyjściowej (250mW).

W obwodzie wyjściowym wzmacniacza zastosowano obwód Zobela, C21, R18, przeciwdziałający oscylacjom wielkiej częstotliwości, które mogłyby powstać na indukcyjności głośnika. Kondensator C22 nie dopuszcza do głośnika składowej stałej napięcia wyjściowego. Blokowanie wzmacniacza mocy dla niskich częstotliwości zapewnia kondensator elektrolityczny C18, a dla wysokich ceramiczny C19.

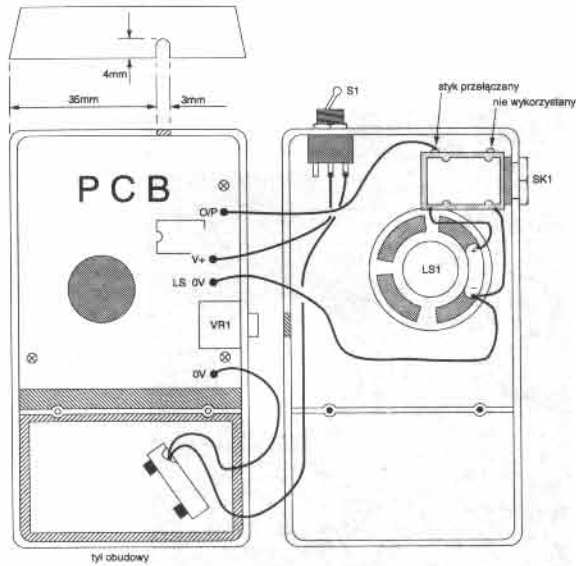
Podzespoły

Wszystkie kondensatory wyznaczające częstotliwość powinny być ceramiczne, o zerowym współczynniku temperaturowym NP0, a jeszcze lepiej o ujemnym N150. Kondensatory N150 kompensują dodatni współczynnik temperaturowy zastosowanych indukcyjności z ferrytowym rdzeniem.

Większość kondensatorów ceramicznych N150 można odróżnić



Rys. 5. Wymiary obudowy i otwory, które należy w niej wykonać.



Rys. 6. Połączenia podzespołów w obydwu częściach małej obudowy.

po pomarańczowym pasku u góry. Jednakże dążenie do wysokiej stabilności Theremina jest chybione, ponieważ ma on zawsze tendencję do dryfowania w zależności od temperatury, wilgotności powietrza i odległości innych obiektów.

Wszystkie pozostałe kondensatory służą do blokowania, do czego można stosować tanie kondensatory ceramiczne o szerokiej tolerancji lub elektrolytyczne.

W układzie zastosowano tanie tranzystory wielkiej częstot-

liwości, często stosowane w radioodbiornikach. Można jednak również użyć tranzystorów małej częstotliwości, np. BC182, może to jednak wymagać zmian w obwodach emiterowych, aby zachować czystą sinusoidę. Do detektora przewidziano diody Schotky'ego, ale stare germanowe w rodzaju OA91 nadają się również dobrze.

Montaż

Mozaika ścieżek od spodu płytki drukowanej Theremina i rozmieszczenie na niej elementów są pokazane na rys. 4. Montaż nie

powinien sprawić żadnych trudności. W celu zminimalizowania sprzężenia magnetycznego pomiędzy dwoma generatorami, indukcyjności L1 i L2 zostały umieszczone niemal w przeciwnych rogach płytki, ułożone względem siebie pod kątem prostym. L1 jest wlutowana na leżąco, a L2 na stojąco.

Jeszcze w czasie studiów, z początkiem lat osiemdziesiątych, na widok wykonanego przeze mnie mieszacza z wszystkimi rezystorami umieszczonymi pionowo, mój wykładowca rzucił: nie rób chłopcze więcej takich łanów zboża. W tym jednak wypadku nie ma co się wstydić „łanu zboża”, jest to bowiem jedyna alternatywa wobec technologii montażu powierzchniowego, pozwalająca nadać Thereminowi rozmiary kieszonkowe.

Montaż powinien być wykonywany według zasady „od najniższych do najwyższych”, pomimo że jest sprzeczna z zasadą „najpierw rezystory”, której nie można stosować przy montażu elementów pionowo. Dobrze zacząć od montażu podstawek układów scalonych. Trzeba uważać przy zginaniu wyprowadzeń diod i cewek. Tranzystory niezależnie od ich małej wysokości należy zgodnie z dobrym zwyczajem wmontować na końcu.

Trymer VC1 musi zostać umieszczony na płytce od strony ścieżek. Jego lutowanie jest trud-

ne, wymagające lutownicy z cienkim grotem, który aby osiągnąć końcówki musi zmieścić się pod trymerem. Końcówki potencjometru należy dokładnie dociąć przed lutowaniem, ponieważ połączenia lutowane potencjometrów z drukiem są poddawane sporym naprężeniom.

Urządzenie jest niewielkich rozmiarów, więc wymiarowanie otworów i detali montażowych ma większe niż zazwyczaj znaczenie. Szczegółnej precyzji wymagają otwory 2,5mm, ciasno mieszczące się na płytce. Konieczne jest staranne dopasowanie płytki do obudowy. Należy wykonać to jeszcze przed jej zmontowaniem, trymer jest wrażliwy na opilki i pył oraz otarcia.

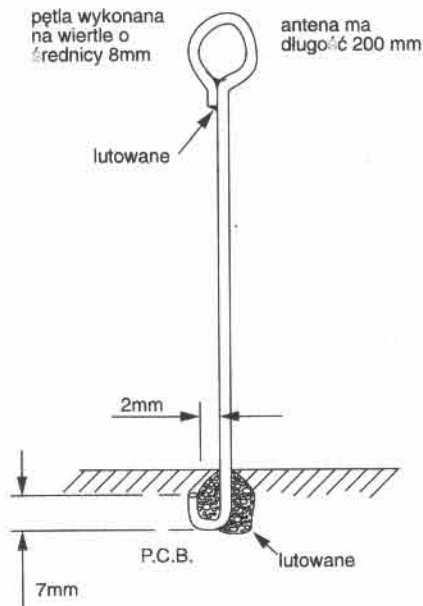
Głośnik mocuje się za pomocą dowolnego kleju. Ważne, aby magnes użytego głośnika był z colmaru lub alnico, ponieważ pospolitsze magnesy ferrytowe są za duże i kolidowałyby z elementami na płytce drukowanej. Głośnik nie będzie musiał działać w pełnym zakresie, więc wystarczy pojedynczy otwór odsłaniający jego cewkę. Będzie ona wystarczająco osłaniana i specjalna siatka ochronna nie jest potrzebna. Rys. 5 przedstawia zwymiarowaną obudowę.

Połączeń w urządzeniu jest niewiele, tylko dla baterii, wyłącznika, gniazdka wyjściowego i głośnika. Szczegóły połączeń są pokazane na rys. 6. Wyprowadzenia gniazdka muszą zostać przygięte, aby obudowę dało się zamknąć.

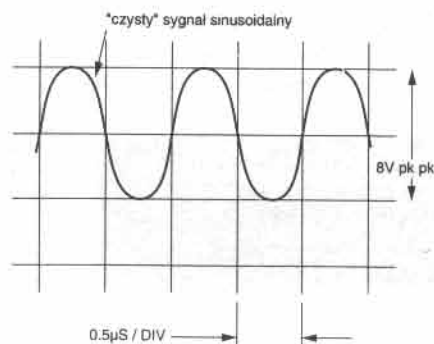
Antenę należy wykonać z ocynowanego drutu miedzianego o średnicy 1,5mm i przylutować do czterech szpilkowych końcówek lutowniczych, co wyjaśnia rys. 7. Dobrą wytrzymałość połączenia zapewni uprzednie przylutowanie końcówek do płytki dużą lutownicą. Standardowa technika wciskania ich do płytki w tym wypadku nie wystarczy.

Testowanie

Najczęstszą przyczyną braku dźwięku podczas testowania jest zbyt duża różnica częstotliwości generatorów, wynikająca z tolerancji elementów. Zerowa częstotliwość dudnień powinna wypadać w pobliżu środkowej pozycji VC1. Powyżej tego punktu zbliżanie dłoni do „anteny wysokości tonu”



Rys. 7. Konstrukcja i montaż anteny wysokości tonu.



Rys. 8. Oscylogram sygnału wyjściowego oscylatora, zdjęty przy pomocy sondy "x 10". Ze względu na rezonans napięcie sygnału może przewyższać napięcie baterii.

powinno wywoływać wzrost częstotliwości. Ciekawe, że poniżej tego punktu częstotliwość maleje. Jeżeli częstotliwości nie udaje się wystarczająco zbliżyć za pomocą VC1, to trzeba odpowiednio zmodyfikować C10 lub C3.

Inną przyczyną braku dźwięku może być brak oscylacji w jednym z generatorów. Najczęstszą tego przyczyną bywa przerwa w indukcyjności, błędne połączenie tranzystora lub zwarcie międzyszczytkowe. W razie możliwości powinno się sprawdzić oscylatory oscyloskopem, przy pomocy sondy „x 10”, która lepiej separuje układ od oscyloskopu. Sygnał oscylatora powinien mieć kształt ładnej sinusoidy o wielkości kilku woltów (wartość międzyszczytkowa), jak to widać na rys. 8.

Sygnał wyjściowy prostego Theremina także powinien mieć formę ładnej sinusoidy, jest to bowiem standardowy „dźwięk Theremina”. Niektóre mogą otrzymać brzęczący dźwięk na skutek harmonicznych. Może to czasem przyczyniać się do dobrych rezultatów, jeżeli stosuje się obróbkę dźwięku.

Dźwięk bogaty w harmoniczne można uzyskać przez obcinanie sygnału przesterowując stopień mieszający. Innym sposobem może być zwiększenie sprzężenia oscylatorów przez zmniejszenie oporności rezystorów R9 i R10, albo przez wywołanie sprzężenia magnetycznego.

Oryginalne Thereminy były tak projektowane, aby struktura harmoniczna ich dźwięku przypominała skrzypce. Ciekawe, że pan Leon doszedł do tego drogą cier-

pliwych prób odsłuchowych, nie mając wówczas możliwości jakie dziś stwarzają oscyloskopy i analizatory dźwięku.

Używanie Theremina

Nie ma co oczekiwać, że od razu uda się zagrać melodię na Thereminie, ponieważ gra na nim jest bardzo trudna. Jedną z przyczyn jest niecodzienny sposób wpływania na wysokość dźwięku, szybko wzrastającego ze zbliżaniem dłoni do „anteny”. Po drugie, praktyczny zasięg sterowania wysokością tonu ogranicza się do kilkunastu centymetrów i jest pozbawiony dotykowego sprzężenia zwrotnego. Instrument ten jednak nadaje się znakomicie do efektów specjalnych, a odtwarzanie melodii staje się możliwe po nabraniu wprawy. Do sterowania głośnością można zastosować pedał gitarowy.

Theremin wywołuje niewielkie zakłócenia odbioru radiowego z modulacją amplitudy, a jego gwizd jest słyszalny w dolnej części zakresu fal średnich. Nie jest to zbyt uciążliwe, ponieważ nie ma tam wielu stacji, a zakłócenia powstają w odległościach nie większych niż kilka metrów.

Tradycyjnym sposobem gry na Thereminie jest poruszanie dłonią względem anteny wysokości tonu. Trzymany w ręku prosty Theremin może być także poruszany względem nieruchomego obiektu przewodzącego, na przykład lampy stołowej.

Interesujące efekty osiąga się przy grze dwoma Thereminami, poruszanymi względem siebie, powstają bowiem dudnienia wzajemne, a zetknięcie anten powoduje ich blokadę. Doświadczywszy dziecięcej „wojny thereminowej” sugeruję jej dopuszczalność tylko w pomieszczeniu dźwiękoszczelnym! Dzieci uwielbiają Thereminy, które mogą też mieć zalety terapeutyczne dla niepełnosprawnych.

Jake Rothman, EwPE

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

Prawo do schematu i układu płytki drukowanej jest własnością Longwave Instruments i nie mogą być one wykorzystywane do celów handlowych.

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

0,25W, 5%, węglowe warstwowe
 R1, R5: 150kΩ
 R2, R6: 33kΩ
 R3, R7, R12: 4,7kΩ
 R4, R8: 560Ω
 R9: 4,7MΩ
 R10: 2,7MΩ
 R11: 220kΩ
 R13: 220Ω
 R14, R17: 12kΩ
 R15, R16: 2,2kΩ
 R18: 4,7Ω
 VR1: 10kΩ, potencjometr liniowy, oś ϕ 3mm

Kondensatory

C1, C6, C19, C21: 100nF ceramiczny, +80%, -20%
 C2, C5, C7, C9, C15...C17: 10nF, \pm 20%
 C3: 27pF, ceramiczny, \pm 2%, NPO lub N150
 C4, C8, C11, C12: 100pF, ceramiczny, NPO lub N150
 C10: 15pF, ceramiczny, NPO lub N150
 C13, C20: 47µF/10V, stojący
 C18, C22: 220µF/10V, stojący
 VC1: 10pF, trymer, Phillips

Półprzewodniki

D1, D2: BAT25, dioda Schottky'ego
 TR1...TR3: BF195, npn
 IC1: LM386, niskonapięciowy wzmacniacz mocy

Indukcyjności

L1, L2: 100mH

Różne

B1: bateria alkaliczna 9V (PP3) z zatraskiem
 SK1: gniazdko mono z rozłącznikiem 6,3mm
 S1: jednoobwodowy wyłącznik miniaturowy
 LS1: głośnik 8Ω, ϕ 38mm z magnesem alnico
 plastikowa obudowa z przedziałem na baterię (105mmx60mmx28mm)
 płytka drukowana, kod 952
 8-stykowa podstawka układu scalonego
 pokrętło ϕ 10mm do osi ϕ 3mm
 jednostronne końcówki lufownicze
 ocynowany drut Cu ϕ 1,5mm, około 250mm
 linka montażowa