



Středoškolská technika 2009
Setkání a prezentace prací
středoškolských studentů na ČVUT

Theremin – konstrukce hudebního nástroje

Jan Staněk

SŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA SDĚLOVACÍ TECHNIKY
Praha 1, Panská 3

Anotace

Česká

Projekt "Theremin" vznikl s účelem sestavení funkčního vzorku bezdotykového hudebního nástroje. Tento dokument se zabývá principy funkcí, mechanickým řešením, ale nezapomíná ani na samotného autora tohoto hudebního nástroje, Lev Sergejeviče Těrmena. Výchozí schéma "Theremin 144" od A. Harrisona bylo upraveno podle aktuálních potřeb a po úspěšném otestování zrealizováno na plošných spojích vyrobených firmou Pragoboard.

Tento projekt se pro mne stal vědomostním přínosem nejen v oblasti principů jednotlivých funkčních celků, ale i po stránce samotného výrobního procesu.

English

The project called Theremin came into existence in order to set up a fully functional example of a touchless musical instrument. This document deals with the principles of functions, with a mechanical solution, but also reminds the reader of the author of this instrument, Lev Nikolajevič Termen.

The initial scheme Theremin 144 by A. Harrison was adjusted to our needs and after a successful testing it was realised on printed connections made by Pragoboard company.

This project gave me full understanding not only in the field of the principles of respective functional units, but also in the manufacturing process itself.



Obsah

Obsah.....	2
O thereminu.....	4
Lev Sergejevič Těremen.....	4
Základní princip a způsob hraní	7
Jak se tedy na tento nástroj hraje?	7
Známí thereministé, užití tohoto nástroje	9
Thereministé	9
Kde můžeme theremin slyšet?	9
Konstruktéři	10
Schéma zapojení.....	11
Odlišnost od původního Těremenova návrhu, proč polovodiče.....	11
Popis jednotlivých částí, problematika a dění v částech obvodu.....	12
Zdroj elektrické energie, stabilizátor napětí	12
Oscilátory.....	15
Ovládání hlasitosti	20
Předzesilovač, zpracování signálů	24
Koncový stupeň	26
Konstrukce.....	30
Předpoklady, prostorové řešení	30
Plošné spoje	31
Postup návrhu	31
Výrobní proces.....	34
Příslušenství.....	36
Konstrukce	36
Antény.....	37
Oživení přístroje	38



Závěr	40
Seznam zdrojů, použité literatury a softwaru	40
Použitá literatura	40
Seznam zdrojů informací na internetu	40
Software použitý při výrobě	40
Seznam obrázků a příloh	41
Obrázky použité v textu	41
Obrázky v příloze	41
Seznam příloh	42
Přílohy	43
Obrázky, výkresy	43
Attach. 1	49
Epilog a celkové hodnocení	50

O thereminu

Lev Sergejevič Těrmen (Лев Сергеевич Термен)

Než začneme hovořit o samotném nástroji, měli bychom vědět co předcházelo jeho objevu. Pomyslný příběh byl odstartován 15. srpna 1896 v ruském Sankt-Petěrburku, kde světlo světa spatřil Lev Sergejevič Těrmen poprvé.

Obr. 1



Již na základní škole byl mladý Těrmen elektřinou fascinován a od svých sedmi let se jí věnoval. Po zvládnutí základních principů se ve svých třinácti letech začal blíže věnovat vysokofrekvenční technice se kterou experimentoval. Na střední škole demonstroval svým spolužákům a jejich rodičům různorodé optické efekty s užitím elektřiny. V sedmnácti letech kdy byl v posledním ročníku střední školy již měl vybudovanou vlastní laboratoř, ve které dále experimentoval s vysokofrekvenčními obvody, optikou a magnetickým polem. Roku 1913 navštívil se svým bratrancem **Kyrillem** obhajobu diplomové práce profesora technického institutu **Arama Fedoroviče Loffa** na téma elektronů, základním fotoelektrickém jevu, magnetickém poli katodového záření a souvisejících šetřeních. Na rozdíl od ostatních, Loff tvrdil že nás tyto záření neustále obklopují, což Lev shledal za zjevné vysvětlení a vědecký pohled na svět. Od této chvíle se začal Lev zajímat také o mikrokosmos a makrokosmos se svým doma vyrobeným teleskopem. Později ho Kyrill představil osobně profesoru Loffovi jako mladého experimentátora, fyzika a budoucího studenta univerzity.

Samotný vynález tohoto hudebního nástroje byl spíše náhodou než úmyslem, za dob ruské občanské války se Těrmen účastnil vládou financovaného výzkumu pro senzory na měření vzdálenosti, právě během tohoto výzkumu si uvědomil vliv kapacity lidského těla na činnost elektronkového oscilátoru a na základě tohoto jevu zkonstruoval roku 1919 monofonní hudební nástroj, který pojmenoval „**Etherphone**“, jemuž se později ujalo označení „**Theremin**“, a také „**Termenvox**“. Na obdobném principu také jako první vynalezl detektor pohybu známý pod názvem „radio watchmen“ (rádiový hlídač).

Roku 1927 byl Těrmen poslán na turné po Evropě, během kterého představoval svůj vynález širšímu obecenstvu. Mimo rusko je Lev Těrmen znám spíše jako **Léon Theremin**. Toto jméno užívá i ve spojených státech, do kterých si našel cestu a dorazil 30. prosince 1927 se svojí první ženou **Katí Konstantinovou**.



V roce 1928 účinkoval se svým nástrojem v New Yorkské filharmonii, téhož roku si svůj vynález i patentoval a začal spolupracovat se společností **RCA** (Radio Corporation of America). Ve třicátých letech zakládá v New Yorku laboratoře, ve kterých experimentuje s jinými hudebními nástroji a vynálezy. Jednou z aktivit byla práce na hudebním nástroji „**Rhytmicon**“ iniciovaná hudebním teoretikem **Henry Cowellem**. V roce 1930 účinkovalo deset thereministů na jevišti v Carnegie hall, o dva roky později vedl Theremin první elektronický orchestr ve kterém figuroval theremin a jiné elektronické nástroje včetně **Thereminova „Hmatníku“** který tvarem připomínal violoncello. V této době se Theremin učil především od spolku vědců, skladatelů a hudebních teoretiků, včetně skladatele **Josepha Schilingera** a amatérského violoncellisty a fyzika **Alberta Einsteina**, začal také úzce spolupracovat s thereministkou **Klárrou Rockmorovou**. Další směr o který se Theremin zajímal byla taneční hudba, zde zjistil sestavu pozic antén, které dokázaly reagovat na tanečnickovy pohyby a vytvořit spoustu variací zvuků a světel, tento nástroj byl pojmenován jako „**Terpsitone**“, podle výkazů bylo však nástroj téměř nemožné ovládat.

Další Thereminův osud se v různých pramenech liší, dá se však říci že se v roce 1938 vrátil do Sovětského svazu, ačkoliv není přesně známo za jakých okolností, nejpravděpodobněji se jednalo o finanční potíže v USA. Po návratu do Sovětského svazu byl prý uvězněn a musel pracovat v Kolymských zlatých dolech. Ve skutečnosti měl být v Sharaskhe v tajných laboratořích a pracovat na špionážní technice pro KGB. V roce 1947 byl oceněn Stalinovou cenou za vynález odposlouchávacího zařízení „**Buran**“ jež pomocí IR paprsku zaznamenávalo na dálku chvění skleněné okenní tabule.

Po propuštění ze Sharaskhy v roce 1947 se znovu oženil. Ve službách KGB pracoval až do roku 1966, poté pracoval 10 let v Moskevské hudební konzervatoři. Zde byl objeven zpravodajem New York Times, ale poté co se objevil článek od Christophera Walkera, podle Lydie, viceprezident konzervatoře prohlásil „Lidé nepotřebují elektronickou hudbu. Elektrina je pro zabíjení zrádců na elektrickém křesle“. Načež propuštěný Léon zavřel svoji laboratoř. V sedmdesátých letech začal Léon cvičit svoji 9 letou neteř **Lydii Kavinu** na theremin. **Kavina** byla poslední Léonův žák a dnes je považována za jednu z nejslavnějších a nejnadanějších thereministek na světě.

Po 51 letech v Sovětském svazu začal Léon cestovat, první návštěvou byla Francie v červnu 1989 a následně Spojené Státy v roce 1991, kde se opět setkal s **Klárrou Rockmorovou**. Také udělal propagační koncert v Královské konzervatoři v Hagu začátkem roku 1993.



Obr. 2



Léon Theremin, vlastním jménem Lev Sergejevič Těrmen dne 3. listopadu 1993 v Moskvě zemřel ve věku 97 let.



Základní princip a způsob hraní

Theremin, po všech stránkách velmi netradiční hudební nástroj, je prvním plně elektrickým hudebním nástrojem, dokonce je prvním a doposud jediným hudebním nástrojem, kterého se hudebník při hře vůbec nedotýká.

Odrazovým můstkem všeho bylo zjištění vlivu kapacity lidského těla na frekvenci elektronového oscilátoru. Z tohoto, pro hudební nástroj, netradičního principu vzešla i netradiční konstrukce. Dvě antény na dřevěné skřínce sice nevytváří dojem plnohodnotného nástroje, nicméně pro nás není důležité, jak tento nástroj vypadá, nýbrž jak se chová.

Základem celého zařízení je oscilátor (viz oscilátory, str. 16), který se dá kapacitou lidské ruky "přeladit" na vyšší frekvenci. Naneštěstí by takto získaný rozsah byl příliš malý a jen těžko bychom mohli postřehnout jakoukoliv změnu v získaném tónu. Řešení jak oscilátor rozladit o vyšší kmitočty byl prostý, naladit ho na kmitočty o mnoho vyšší, kde se více projevila změna kapacity. Problémem tohoto řešení je, že vysoké kmitočty lidské ucho není schopné vnímat. Odpovědí na tento problém byl zázněj (viz oscilátory, str. 20, obr. 7), jev při skládání dvou sobě blízkých frekvencí. Konstrukce se tedy doplnila o druhý oscilátor, který se nerozladoval, nýbrž poskytoval kmitočty pro vytvoření zázněje. Takto získaný signál se dále zpracoval, aby jej bylo možné reprodukovat. Na stejném principu pracuje i druhá, téměř identická část zařízení, která slouží k ovládání úrovně hlasitosti reprodukováného zvuku, pouze s tím rozdílem, že zde se získaná frekvence převede na úroveň napětí. Tyto signály se v další části zařízení zpracují a zesílí koncovým stupněm.

Jak se tedy na tento nástroj hraje?

Nyní budu popisovat původní, pravorukou verzi, neboť levoruká verze je spíše výjimečným exemplářem. Základním rysem tohoto hudebního nástroje je mechanická jednoduchost, místo klaviatury nebo jakéhokoliv mechanického prvku jsou zde pouze dvě antény, vpravo umístěná anténa je tzv. "Pitch" anténa, jinak řečeno slouží ke změně frekvence, neboli výšky reprodukováného tónu a obsluhuje se pravou rukou. Samotné hraní spočívá na pohybu ruky v blízkosti této antény, čím blíže se rukou přiblížíte, tím vyšší tón bude reprodukován. Na levé straně se nachází tzv. "Volume control" anténa, která se obsluhuje levou rukou. Čím blíže se anténě přiblížíte, tím tišeji bude tón reprodukován. Tato anténa je vždy vodorovná, zpravidla tvořena smyčkou nebo deskou.



Po zvukové stránce je pro theremin charakteristické Glissando, nebo-li plynulé posouvání mezi jednotlivým tóny změnou intonace, a vibráto, což je pravidelné mírné kolísání intonace na daném tónu. Velmi zdatní thereministé jsou schopni zahrát i staccato, tato technika hraní je však pro theremin nesmírně obtížná a málokdo ji ovládá.

Ačkoliv hra na tento nástroj spočívá na jednoduchém principu, zvládnutí techniky vyžaduje dobrou paměť, velmi dobrý hudební sluch a nespočet hodin cvičení.



Obr. 3



Známí thereministé, užití tohoto nástroje

V úvodu tohoto článku bych se chtěl pouze zmínit, že úsilí vložené do vyhledání informací s tímto tématem vede k nepřebernému množství údajů, z nichž budou některé vynechány, některé pouze uvedeny, a jen některými se budeme zabírat v souvislostech.

Thereministé

Jistě není pochyb o tom, že nejznámějším thereministou byl samotný vynálezce, kterému byla pozornost věnována v předcházejících textech, a tak se jím zde nebudeme již dále zabírat.

Na pomyslném druhém místě figuruje **Klára Rockmorová** rozená Reisenbergová (9.března 1911 – 10.května 1998), která s Léonem Thereminem úzce spolupracovala ve spojených státech. Klára byla velmi nadaná umělkyně s výborným citem pro melodii. Pro zajímavost, již ve dvou letech dokázala zazpívat melodii, pokud ji předtím slyšela hrát na klavír. Postupem času si vytvořila vlastní styl hry a zasloužila se i o zdokonalení samotného hudebního nástroje zejména tím, že si uvědomila hranice původního modelu. Sám Léon Theremin zkonstruoval exemplář nástroje na základě jejích unikátních požadavků, mezi kterými je například citlivější „Volume control“ anténa (viz kapitola, stránka) a větší rozsah hratelých tónů.

Další umělkyní není nikdo jiný než **Lydia Kavina** (8. září 1967), praneteř Léona Theremina. Lydie bylo devět let když se začala věnovat hře, a to přímo pod taktovkou 80 letého vynálezce. Za dalších 5 let uskutečnila svůj první koncert, který se pokládá za začátek její kariéry. Během své kariéry hrála v mnoha světoznámých koncertních sálích a podílela se na mnohých zvukových doprovodech, včetně Oskarem oceněného filmu „Ed wood“. Dnes je Lydie pokládána za nejlepšího žijícího hráče světa.

Bez povšimnutí však nemohou zůstat ani další umělci, jako například **Konstantin Kovalsky**, **Carolina Eyck**, nebo jazzový umělci **Eric Ross** a **Kip Rosser**. Jako další jsou v pořadí **skladatelé**, kteří pro theremin skládali. Mezi ně patří například Lera Auerbachová, Bohuslav Martinů, Dmitri Shostakovich, Charles Ives, Percy Grainger, Christian Wolff, Joseph Schillinger, Alan Hovhaness, Edgar Varese, Moritz Eggert, Iraida Yusupova, Jorge Antunes, Vladimir Komarov, Anis Fuleihan a Dalit Warshaw.

Kde můžeme theremin slyšet?

Odpověď by mohla být velmi stručná, neboť popularita tohoto nástroje sahá téměř všude. Jistě můžeme zmínit New Yorkskou filharmonii, královskou Stockholmskou filharmonii, Lincolnovo centrum, nebo filharmonický Disney Hall v Los Angeles.



Nelze opomenout ani podíl v jiných sférách než v klasické hudbě. Theremin byl použit i ve skladbách populární hudby od skupin Portishead, the Beatles, the Rolling Stones nebo ve skladbě „Whole lotta love“ od Led Zeppelin.

Ani televizní diváci nebyli ochuzeni o zvuky tohoto nástroje, ačkoliv si to ani neuvědomili. Poznamenán byl kdokoliv kdo viděl originální sérii „**Star Treku**“ (1966 – 1969), druhou sérii seriálu „**the Outer limits**“ nebo jakoukoliv epizodu seriálu „**Vraždy v Midsomeru (Midsomer murders)**“, kde si theremin zahrál úvodní melodii. Thereminu byly věnovány i epizody v seriálech jako jsou „Simpsonovi“ nebo „Futurama“. Roku 1993 natočil režisér Steven M. Martin dokumentární film „**Theremin: An Electronic Odyssey**“, který pojednává o jedné z nejpodivnějších postav dvacátého století, Levu Sergejeviči Těrmenovi.

V kinosálech se rozléhaly tóny thereminu ve filmech Odná, Spellbound, Červený dům, Ztracený weekend, Točité schodiště, Den kdy se zastavila země, Desatero přikázání, V tom domě straší, Ed wood, Mechanik, Hellboy nebo Delikátní delikvent.

Příběh Léona Theremina se dostal i na prkna divadelní scény, a to v podobě velmi úspěšné inscenace **Petra Zelenky „Teremin“**, kterou uvedlo Dejvické Divadlo 17. listopadu 2005 s **Ivanem Trojanem** v hlavní roli.

Konstruktéři

Nelze zanechat bez povšimnutí, že ke hře na hudební nástroj je zapotřebí hudební nástroj. V nedaleké minulosti se o množství variant a podob thereminu zasloužili především pánové **Arthur Harrison** s firmou „**Harrison Instruments**“, a **Robert Moog** s firmou „**Moog Music**“.

Oba konstruktéři se zasloužili o zdokonalení nástroje a stále ve vývoji pokračují.



Schéma zapojení

Odlišnost od původního Těrmenova návrhu, proč polovodiče

Jak již bylo nastíněno v předcházejícím textu, prošel theremin od svého vzniku množstvím úprav, z nichž některé byly v mnoha ohledech radikální. Postupným zdokonalováním a vývojem nových technologií nemohl zůstat nástroj nedotčen, a tak se dočkal mnoha variant, ze kterých se později budeme podrobněji zabírat pouze jednou.

Vývoj polovodičů znamenal radikální zlom snad ve všech odvětvích elektrotechnického průmyslu. S příchodem tranzistorů přišli i nová řešení a nelze se tedy divit, že z původního nástroje přežila pouze myšlenka a princip, ze kterého vzniklo množství modelů. Základem všeho je vždy zdroj frekvence, a právě zde se návrhy liší. Původní řešení s rezonančními obvody, kde bylo zapotřebí množství indukčností, se nahradilo jednoduššími principy vzniku kmitočtu, zejména kombinací kondenzátorů a odporů ve zpětné vazbě zesilovače. Samotný zesilovač již nebyl realizován elektronkou, ale tranzistorem, později operačním zesilovačem. Jelikož je původní návrh prakticky nesehnatelný, můžeme pro naše účely pokládat za původní Těrmenovo schéma z roku 1929 pro společnost RCA (viz. příloha obr. 22).

Při srovnání s použitým schématem, jež vychází z návrhu Arthura Harissona „Theremin 144“, (viz. příloha obr. 23), se zdá být elektronkový návrh jednodušší a přehlednější, odrazující je však množství indukčností, složitější konstrukce a v neposlední řadě mnohem vyšší napětí se kterým elektronky pracují.

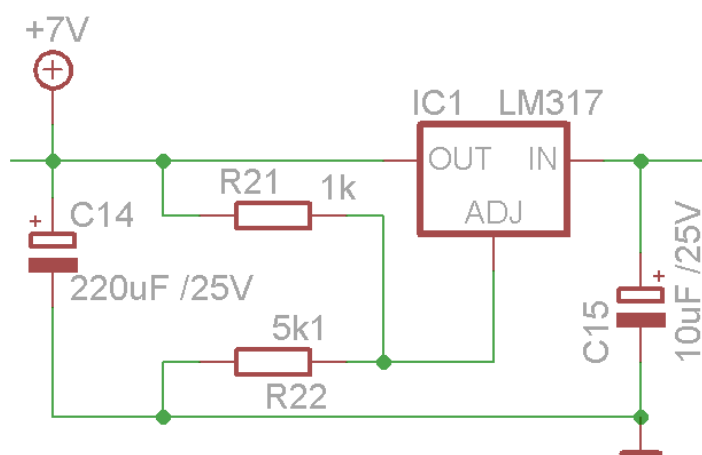
Původní schéma „Theremin 144“ bylo upraveno pouze v detailech, jelikož se jednalo zejména o přizpůsobení dostupným součástkám, bylo zbytečné jednotlivé změny uvádět.

Popis jednotlivých částí, problematika a dění v částech obvodu

Pro lepší názornost a pochopení následujícího textu je v příloze (viz attach 2) náhled zapojení celého zařízení.

Zdroj elektrické energie, stabilizátor napětí

Pro správnou funkci celého zařízení je potřeba přivádět energii do všech částí jeho obvodu, kde je potřeba. Jako zdroj energie lze použít baterie, nebo síťový napájecí zdroj, dodávající stejnosměrné napětí. Z konstrukce nestabilizovaných síťových napájecích zdrojů můžeme odvodit jisté důsledky. Konkrétně, že i po vyhlazení filtračními kondenzátory zůstává na stejnosměrném napětí i střídavá složka, která je nežádoucí zejména v audiotechnice, neboť takzvaný síťový brum je v pásmu slyšitelných frekvencí. Řešením je více frekvenčně závislých prvků (větší filtrační kapacity, tlumivka v sérii se zátěží) ve filtru zdroje, což je konstrukčně a ekonomicky nepraktické, nebo použití stabilizátoru napětí, který dosahuje několikanásobně lepších výsledků. Zde použitý stabilizátor je znázorněn na obr. 4.



Obr. 4

Integrovaný obvod LM317 je tří vývodový napěťový regulátor, jehož výstupní napětí je odvozeno od napětí přivedeného na jeho nastavovací vstup. Pohledem na schéma zapojení je zřejmé, že napětí na nastavovacím vstupu je určeno napěťovým děličem, tvořeným rezistory R_{21} a R_{22} . Ačkoliv je zde porušena zásada kreslení schémat postupem signálu zleva doprava, po usazení do celého návrhu je tato varianta přehlednější. Nestabilizované napětí je přivedeno na „IN“ vstup stabilizátoru, ten se pro představu chová



jako proměnný odpor mezi vstupem a vývodem „OUT“, jehož hodnota se mění tak, aby na výstupu bylo konstantní napětí. Hodnota napětí pro toto zapojení je dána vztahem:

$$U_{out} = V_{ref} * \left(1 + \frac{R_{22}}{R_{21}} \right) + I_{adj} * R_{22}$$

$$V_{ref} = 1,25 \text{ V}$$

Výrobce uvádí, že I_{adj} je přibližně 50uA, je tedy zřejmé že se při výpočtu prakticky neuplatní. Dále udává že referenční napětí má hodnotu 1,25V, toto napětí se obvod snaží udržet mezi výstupem a nastavovacím vstupem, logickou úvahou získáme předpoklad, že napětí výstupu bude vždy o 1,25V vyšší než napětí na nastavovacím vstupu, a právě zde se nachází rezistor R_{21} . Na tomto rezistoru bude vždy napětí 1,25V, spočítáme tedy proud tekoucí rezistory podle následujících zvolených předpokladů:

$$U_{R_{21}} = V_{ref}$$

$$U_{R_{22}} = U_{adj}$$

$$U_{out} = 7,5 \text{ V}$$

$$R_{21} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{V_{ref}}{R_{21}} = 1,25 \text{ mA}$$

$$R_{22} = \frac{U_{adj}}{I} = \frac{(U_{out} - V_{ref})}{I} = \frac{6,25}{1,25 * 10^{-3}} = 5 \text{ k}\Omega$$

Bohužel tato hodnota neleží v řadě E24, byla tedy zvolena co nejbližší možná hodnota $R_{22}=5\text{k}\Omega$. Nyní dopočítáme zpětně hodnotu napětí podle použitých součástek:

$$U_{out} = V_{ref} * \left(1 + \frac{R_{22}}{R_{21}} \right) + I_{adj} * R_{22}$$

$$U_{out} \approx 1,25 * (1 + 5 \cdot 1) = 7,625 \text{ V}$$



Volba napětového stabilizátoru nám také umožňuje použít větší rozsah napájecího napětí přibližně od 9V až do 35V, zároveň můžeme tvrdit že generovaný tón bude na napájecím napětí nezávislý.



Oscilátory

Neboli generátory harmonického signálu

Po připojení napájecího zdroje dochází v rezonančním obvodu k výměně energie mezi cívkou a kondenzátory, přičemž část energie se ztrácí. Nebude-li tato ztracená energie doplňována, dostaneme na výstupu periodické tlumené kmity či aperiodické kmity, což považujeme za nežádoucí jev. Potřebujeme doplnit ztracenou energii a získat netlumené periodické kmity. Z tohoto důvodu je nutné doplnit do obvodu aktivní prvek, a zavést zpětnou vazbu.

Pro zpětnovazební oscilátory obecně platí dvě podmínky kmitání, amplitudová a fázová. Amplitudová podmínka řeší již zmíněný problém ztráty energie v rezonančním obvodu a potřebu tuto energii doplňovat.

$$|\beta| * |A_U| = 1$$

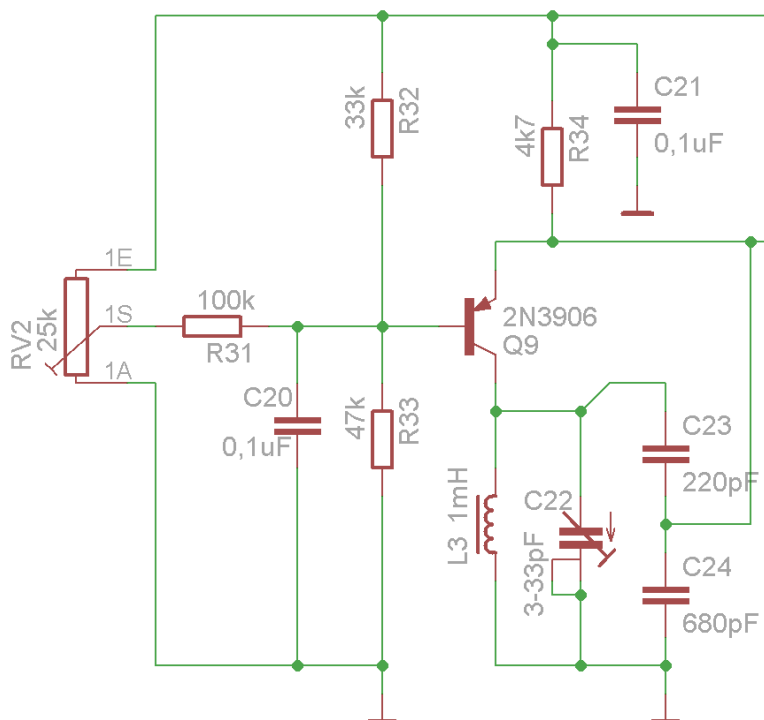
kde „ β “ vyjadřuje přenos zpětné vazby, pro názornost úbytek energie, a „ A_U “ vyjadřuje zesílení aktivního prvku. Tato podmínka nám říká, že harmonické kmitání nastane pouze tehdy, když zesílení aktivního prvku nahradí veškeré ztráty, jež v obvodu vznikly. Bude-li zesílení „ A_U “ příliš malé, kmitání zanikne, bude-li příliš velké, objeví se ve výstupním signálu vyšší harmonické frekvence, v extrémním případě obdélníkový průběh. Jelikož se jedná o střídavý signál musíme tyto hodnoty položit do komplexní roviny pro zohlednění fázových posunů, právě fází se zabývá druhá podmínka.

$$\varphi = \varphi_a + \varphi_b = 2k * \pi$$

$$k \in \mathbb{Z}$$

kde φ_a je fázový posun přímé větve, a φ_b vyjadřuje fázový posun ve zpětné vazbě. Tato podmínka vyjadřuje, že kmitání se udrží právě tehdy, když je výstupní napětí ve fázi se vstupním.

Na obr. 5 je zobrazena část obvodu, ve které se oscilátor nachází.

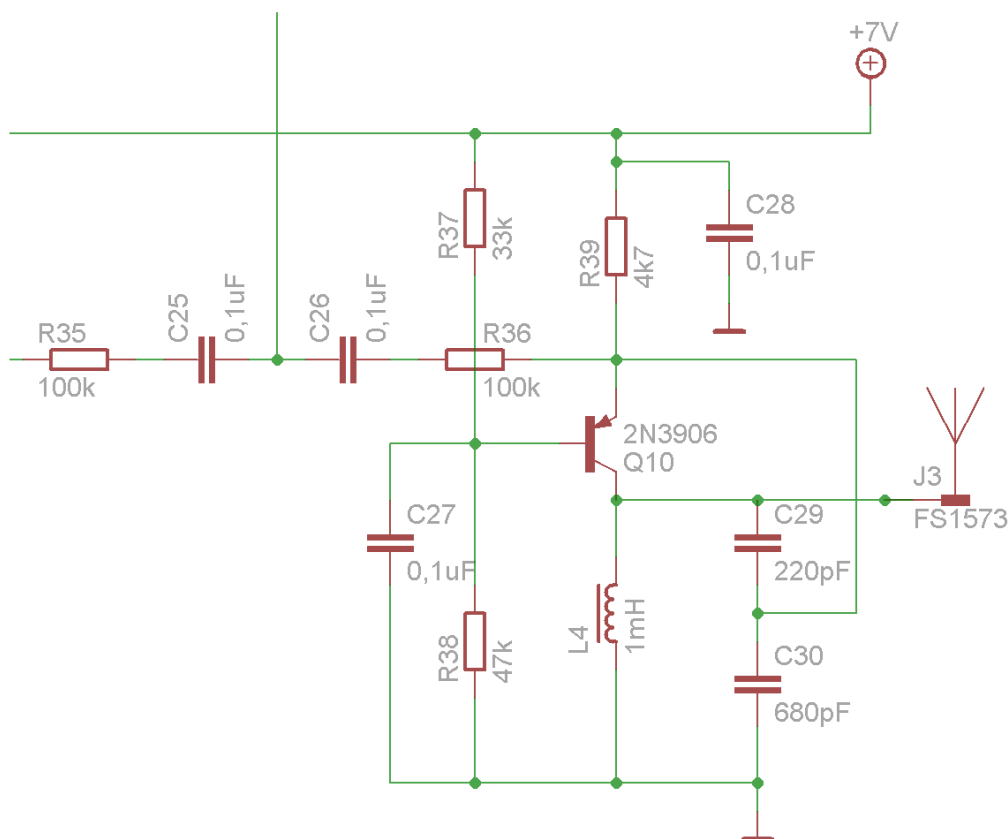


Obr. 5

Zde byl zvolen Colpittsův oscilátor, zejména pro stabilitu frekvence a konstrukční jednoduchost. Jedná se o třibodový oscilátor s tranzistorem v zapojení se společnou bází. Zpětná vazba je zde realizována mezi kolektorem a emitorem. Kondenzátory C_{23} a C_{24} tvoří kapacitní dělič v rezonančním obvodu, což je pro Colpittsův oscilátor typické. Samotný rezonanční obvod je tvořen cívkou L_3 a sérioparalelní kombinací kondenzátorů C_{23} , C_{24} a C_{22} . Kombinací odporů R_{31} , R_{32} , R_{33} a pozicí jezdce potenciometru RV_2 je nastaven pracovní bod tranzistoru pro splnění první, amplitudové podmínky. Jelikož je tranzistor zapojen jako invertující zesilovač, tedy otáčí fázi o 180° , bude fázová podmínka splněna právě tehdy, bude-li o dalších 180° otáčet fázi i zpětná vazba. Z vlastností rezonančního obvodu je zřejmé, že tato situace nastane pouze při jeho rezonančním kmitočtu. Za předpokladu, že se generovaná frekvence rovná frekvenci rezonanční, můžeme ze známých vztahů tuto frekvenci vyjádřit.

$$f = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_3 * \left(\frac{C_{23} * C_{24}}{C_{23} + C_{24}} + C_{22} \right)}}$$

Pro pokračování v teorii vzniku signálu si představíme část obvodu znázorněnou na obr. 6, navazující na část předcházející.



Obr. 6

Levý vývod rezistoru R_{35} představuje výstup výše popisovaného oscilátoru. Jak je na první pohled zřejmé, je tato část shodná s jediným rozdílem, a to odpory R_{35} , R_{36} , kondenzátory C_{25} , C_{26} , a jiným uspořádáním kondenzátorů v rezonančním obvodu. Tuto změnu představuje nahrazení kapacitního trimru anténou, která má kapacitní charakter v závislosti na pohybu ruky a mění generovanou frekvenci. Ačkoliv se tato frekvence mění jen nepatrně, je tento poznatek velmi podstatný, a dostáváme se tak k funkci výše zmíněných kondenzátorů a odporů.

Tuto kombinaci odporů a kondenzátorů můžeme považovat za funkční jednotku, která principem superpozice sečte na kondenzátorech okamžité hodnoty napětí obou signálů, přivedených přes vstupní



odpory R_{35} a R_{36} . Výstupní odpor této funkční jednotky představuje kombinace odporů v následující části obvodu, z pohledu výstupního signálu.

Matematické vyjádření výchylky harmonického kmitání v diskrétním čase „ t “, s počáteční fází „ φ “ a amplitudou „ A_0 “ lze matematicky zapsat jako:

$$y = A_0 * \sin(\omega * t + \varphi)$$

$$\omega = 2 * \pi * f$$

Jak se již předcházející text zmínil, budeme dva takovéto harmonické průběhy sčítat, jak vyjadřuje následující vzorec:

$$y = A_0 * \sin(\omega_a * t + \varphi_a) + B_0 * \sin(\omega_b * t + \varphi_b)$$

Z předpokladu, že fázový posun obou průběhů byl shodný, a to nulový, a zároveň amplituda obou signálů je stejná, zjednodušíme následující vztah:

$$y = A_0 * (\sin(\omega_a * t) + \sin(\omega_b * t))$$

s pomocí součtových vzorců přepíšeme výsledný vzorec:

$$y = A_0 * 2 * \sin\left(\frac{(\omega_a + \omega_b) * t}{2}\right) * \cos\left(\frac{(\omega_a - \omega_b) * t}{2}\right)$$

Jak je patrné, skládá se výstupní signál z dvou nových frekvencí, z nichž jedna je polovinou součtu obou původních frekvencí, a druhá je polovinou rozdílu obou původních frekvencí. Pro zjednodušení a lepší názornost při diskuzi výsledku si zavedeme opět pár předpokladů, vzhledem k situaci, kdy jsou si oba vstupní kmitočty velmi podobné, budeme předpokládat:

$$\omega_a + \omega_b \cong 2 * \omega_a$$

$$\omega_a - \omega_b \ll \omega_a + \omega_b$$

Po dosazení:

$$\sin\left(\frac{(\omega_a + \omega_b) * t}{2}\right) = \sin\left(\frac{2 * \omega_a * t}{2}\right) = \sin(\omega_a * t)$$

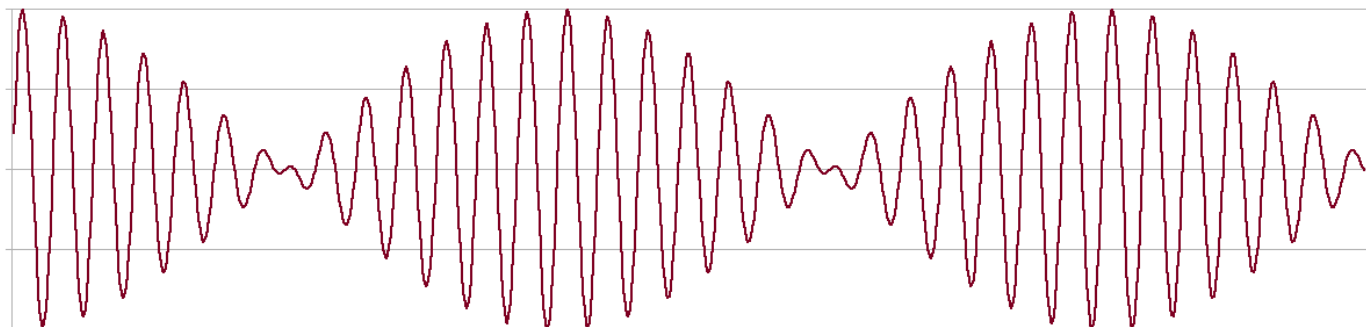
$$y = A_0 * 2 * \sin(\omega_a * t) * \cos\left(\frac{(\omega_a - \omega_b) * t}{2}\right)$$

Z tohoto předpokladu můžeme považovat výstupní signál za harmonické kmitání o frekvenci

$$f = f_a = \frac{\omega_a}{2 * \pi} \text{ s měnící se amplitudou o maximální hodnotě } A_{\max} = 2 * A_{0\max}.$$

Periodické kolísání amplitudy se projevuje jako takzvané rázy, neboli zázněj, jehož frekvence je

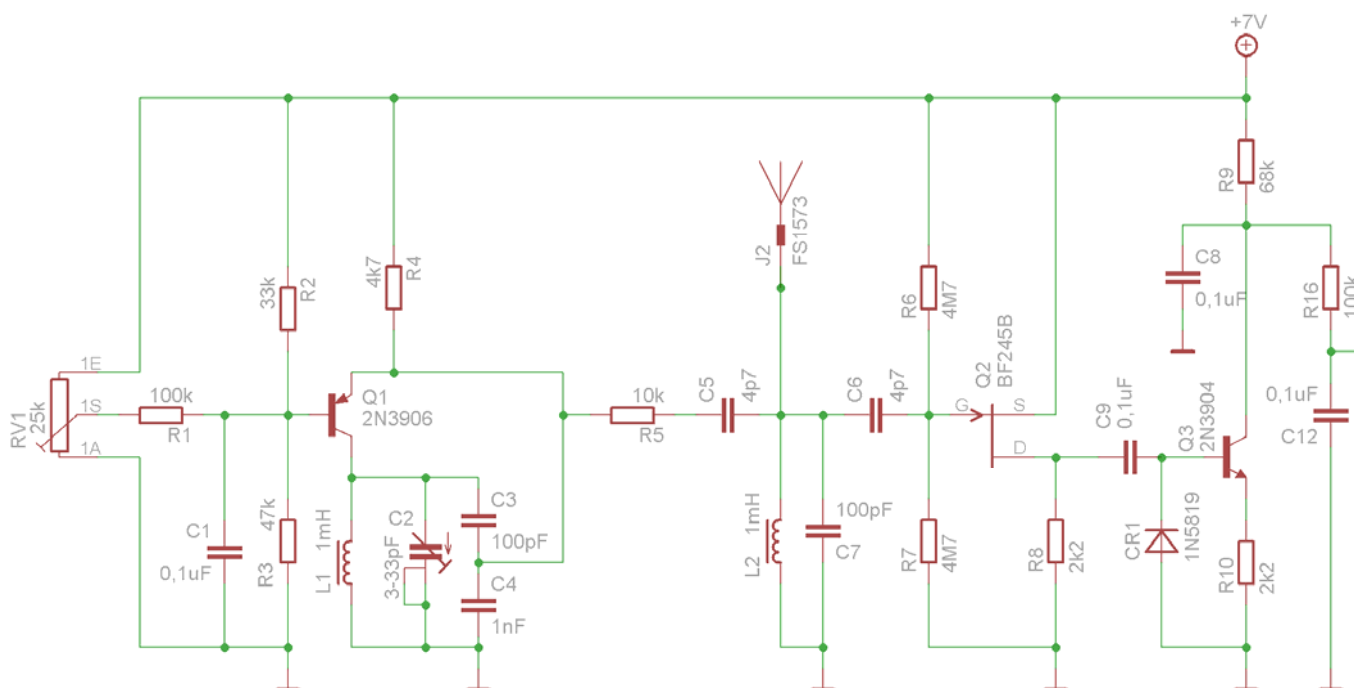
$$f_z = \frac{\omega_a - \omega_b}{2 * \pi} = f_a - f_b. \text{ Pro ilustraci viz. Obr. 7.}$$



Obr. 7

Ovládání hlasitosti

V této části dokumentu se budeme zabývat obvodem, sloužícím k regulaci amplitudy reprodukováného tónu, jež je znázorněn na obr. 8.



Obr. 8

Ačkoliv je pár řádek výše popsáno, že tento obvod slouží k regulaci amplitudy, nemá s produkovaným signálem nic společného. Výstupem tohoto obvodu je pouze stejnosměrné napětí, kterým se ovlivňuje funkce následujících obvodů.

V levé polovině obvodu vidíme nám již známý Colpittsův oscilátor, jehož výstup je přes odpor R_5 přiveden na vstupní svorku článku tvořeného kondenzátorem C_5 a paralelním rezonančním obvodem L_2, C_7 . Právě zde je ukrytý princip celého tohoto zapojení. Pro pochopení principu si uvedeme základní vlastnosti paralelního rezonančního obvodu. Zejména nás zajímá jeho impedance, která spolu s impedancí rezistoru R_5 a kondenzátoru C_5 tvoří napěťový dělič. Přenos toho děliče je možné popsat jako poměr impedance rezonančního obvodu ku součtu všech impedancí.



$$A = \frac{Z_{ro}}{Z_{ro} + Z_{R5} + Z_{C5}}$$

Vyplývá tedy přímá úměrnost mezi impedancí rezonančního obvodu a přenosem celého děliče. Impedanci rezonančního obvodu můžeme vyjádřit následovně:

$$Z_{ro} = \frac{Z_{xL} * Z_{xC}}{Z_{xL} + Z_{xC}}$$

$$Z_C = \frac{U_{ro}}{I_C} \quad Z_L = \frac{U_{ro}}{I_L}$$

Rezance v obvodu nastane právě tehdy, když se impedance cívky rovná impedanci kondenzátoru, v tomto stavu se také podle předchozího vzorce rovnají i procházející proudy. Proud cívkou se opoždí proti přivedenému napětí o fázi 90°, proud kondenzátoru naopak o fázi 90° napětí předbíhá. Z těchto vlastností je zřejmé, že proudy tečou v protifázi. Po dosazení do uvedených vzorců vypočteme impedanci a přenos rezonančního obvodu při rezonanci.

$$I_C \approx -I_L$$

$$Z_{ro} = \lim_{I_C \rightarrow -I_L} \frac{\frac{U_{ro} * U_{ro}}{I_L * I_C}}{\frac{U_{ro}}{I_L} + \frac{U_{ro}}{I_C}} = \lim_{I_C \rightarrow -I_L} \frac{\frac{U_{ro}^2}{I_L * I_C}}{U_{ro} * (I_L + I_C)} = \lim_{I_C \rightarrow -I_L} \frac{U_{ro}}{\rightarrow 0} \Rightarrow \infty$$

$$A = \lim_{Z_{ro} \rightarrow \infty} \frac{Z_{ro}}{Z_{ro} + Z_{R5} + Z_{C5}} \approx 1$$

Vzhledem k vlastnostem reálných součástí budou vždy nějaké ztráty, ale i tak je vidět, že rezonanční frekvenci přenesou tento dělič téměř beze ztrát.

Přibližováním ruky k anténě přičítáme kapacitu těla paralelně ke kondenzátoru C_7 , tím se rezonanční frekvence snižuje. Pro frekvence příliš vzdálené frekvenci rezonanční se obvod jeví jako zkrat a přenos se blíží k nule.



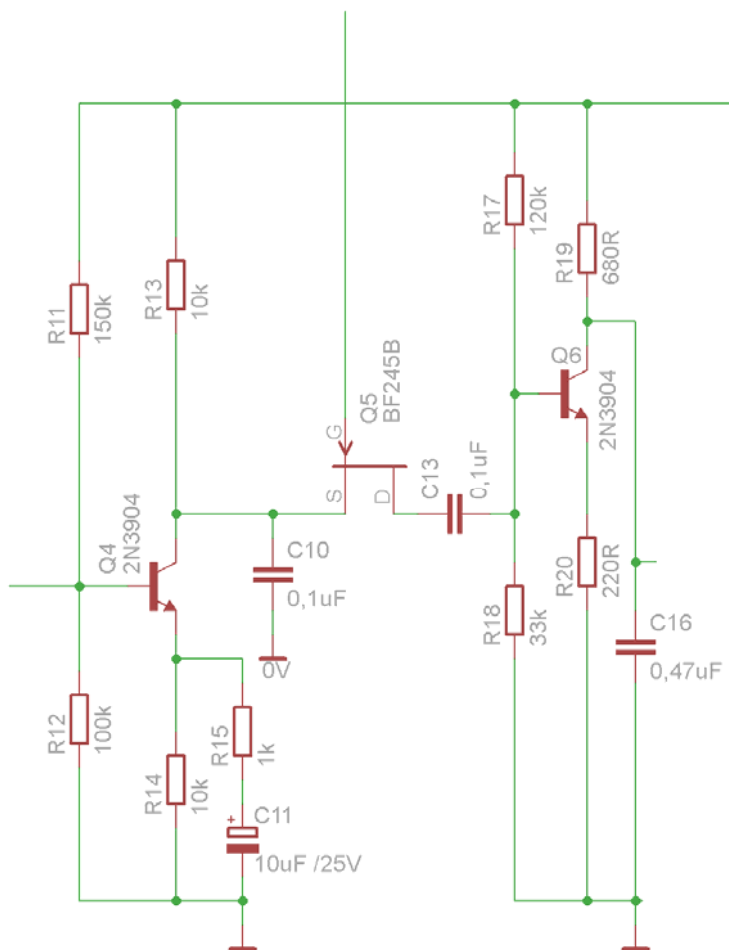
Přes kondenzátor C_6 je střídavé napětí s již regulovanou amplitudou přivedeno na hradlo tranzistoru Q_2 , který se chová pouze jako sledovač a impedančně přizpůsobuje signál pro špičkový detektor tvořený diodou CR_1 u báze tranzistoru Q_3 . Přejde-li na vstup tranzistoru záporná půlvlna, je zkratována diodou,



tranzistor zůstává uzavřen a kondenzátor C_8 se přes odpor R_9 nabíjí. Přijde-li na vstup tranzistoru kladná půlvlna, tranzistor se otevře a přes odpor R_{10} kondenzátor C_8 vybíjí. Napětí kondenzátoru C_8 se přes integrační článek tvořeným rezistorem R_{16} a kondenzátorem C_{12} vyfiltruje a zůstane pouze žádaná stejnosměrná složka.

Předzesilovač, zpracování signálů

V této funkční jednotce znázorněné na obr. 9 se zpracovávají signály z obou předchozích funkčních celků.



Obr. 9

První signál, nesoucí informaci o tónu, je přiveden na vstup invertujícího zesilovače, tvořeného tranzistorem Q₄. Signál je zesílen přibližně desetinásobně s fázovým posunem o 180°, a přiveden na elektrodu source polem řízeného tranzistoru Q₅, ten se chová jako proměnný odpor v závislosti na napětí, přivedeném na elektrodu gate. Tato impedance tvoří spolu se vstupním odporem následujícího zesilovače napěťový dělič. Impedance tranzistoru Q₅ je v otevřeném stavu přibližně 150 ohmů, v uzavřeném stavu dosahuje i několik set tisíc ohmů. Vstupní odpor následujícího zesilovače lze vyjádřit vztahem:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_{17}} + \frac{1}{R_{18}} + \frac{1}{(R_{20} * (h_{21} + 1) + h_{11})}}$$



Katalogový list výrobce udává pro danou situaci zesílení $h_{21} \approx 150$, pro zjednodušení vynecháme zanedbatelné položky a spočteme vstupní impedanci:

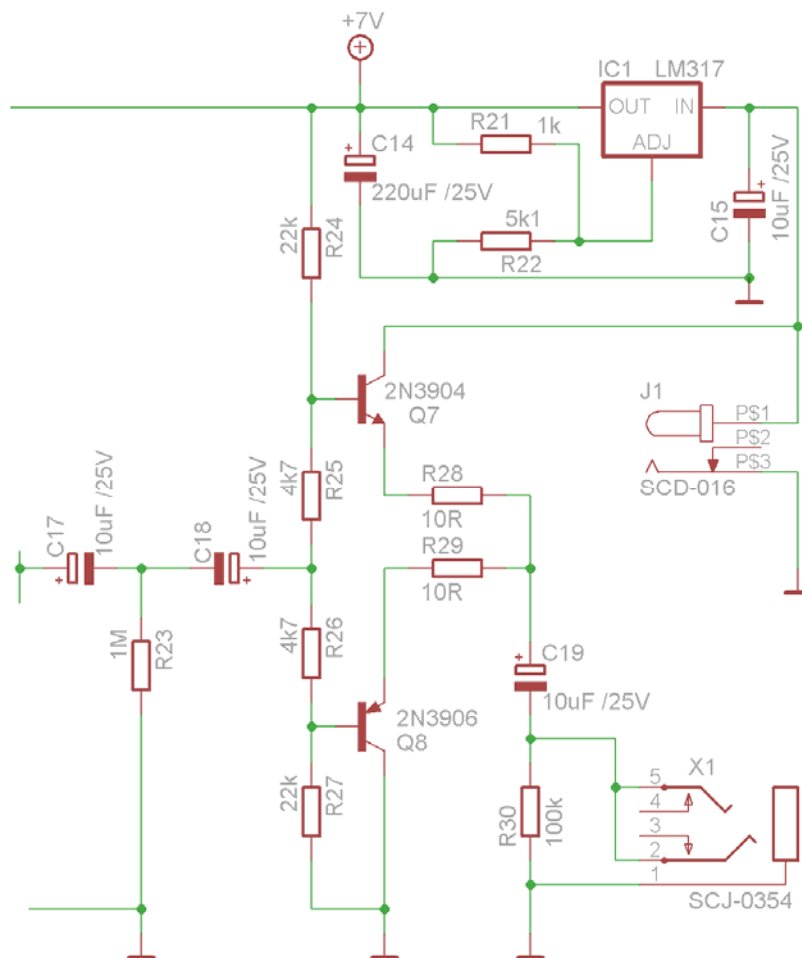
$$Z = \frac{1}{\frac{1}{120k} + \frac{1}{33k} + \frac{1}{220 * (150 + 1)}} \approx 14,5 \text{ k}\Omega$$

Tato impedance je nezávislá vůči okolí, celý přenos tedy spočívá na hodnotě napětí, přivedené z funkčního celku řízení hlasitosti (viz kapitola, strana). Takto regulovaný signál se pomocí tranzistoru Q6 ještě třikrát zesílí, opět s otočením fáze o 180° , a impedančně se přizpůsobí pro koncový stupeň.

V jistém chápání můžeme o tomto celku říci, že se jedná o napětím řízený zesilovač.

Koncový stupeň

V předchozím článku jsme si popsali zpracování signálu, nyní se seznámíme s koncovým stupněm, znázorněném na obr. 10.



Obr. 10

Signál z předzesilovače se přivede přes dvojici kondenzátorů C_{17} a C_{18} na vstup koncového stupně, tento zesilovač pracuje ve třídě AB. Pohledem na zapojení vidíme, že rezistory R_{24} , R_{25} , R_{26} a R_{27} nastavují pracovní body obou tranzistorů. Tranzistory jsou v tomto případě v zapojení se společným kolektorem, které představuje takzvaný emitorový sledovač. Ten se vyznačuje napětovým zesílením pro střídavé signály $A_u=1$, a plní pouze funkci impedančního přizpůsobení.



Za vstupní svorku koncového stupně budeme považovat uzel mezi vývody rezistorů R_{25} a R_{26} . Není-li přiveden žádný signál, protéká tímto uzlem pouze klidový proud z napájecí větve. Budeme předpokládat, že proudy procházející bázemi tranzistorů jsou zanedbatelné. Klidový proud můžeme vyjádřit takto:

$$I_{klid} = \frac{U_{CC}}{R_{24} + R_{25} + R_{26} + R_{27}} = 143 \mu\text{A}$$

Známe-li tento proud, dopočítáme všechna napětí a pracovní bod.

$$U_{vst} = I_{klid} * (R_{26} + R_{27})$$

$$\begin{aligned} U_{B8} &= \frac{U_{vst} * R_{27}}{R_{26} + R_{27}} = \frac{U_{vst} * 22000}{26700} \doteq 0,82 * \left(\frac{U_{CC}}{53400} \right) * (26700) = \\ &= 0,41 * U_{CC} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{B7} &= \frac{(U_{CC} - U_{vst}) * R_{25}}{R_{24} + R_{25}} + U_{vst} \doteq 0,18 * U_{CC} - 0,18 * U_{vst} + U_{vst} = \\ &= 0,18 * U_{CC} + 0,82 * \left(\frac{U_{CC}}{53400} \right) * (26700) = 0,18 * U_{CC} + 0,82 * \left(\frac{U_{CC}}{2} \right) = \left(0,18 + \frac{0,82}{2} \right) * U_{CC} = \\ &= 0,59 * U_{CC} \end{aligned}$$

Známe-li u tranzistoru napětí báze, je triviální záležitostí odvodit napětí na emitoru. V katalogovém listu je uveden údaj tohoto napětí $V_{be} = 0,7\text{V}$ pro NPN tranzistor, a $V_{be} = -0,7$ pro PNP tranzistor. Spočítáme tedy napětí emitoru pro každý tranzistor:

$$U_{E8} = U_{B8} - 0,7 = 0,41 * U_{CC} - 0,7 \text{ V}$$

$$U_{E7} = U_{B7} - 0,7 = 0,59 * U_{CC} - (-0,7 \text{ V}) = 0,59 * U_{CC} + 0,7 \text{ V}$$

Mezi emitory obou tranzistorů se nachází napěťový dělič z rezistorů R_{28} a R_{29} , který představuje výstupní odpor koncového stupně, zároveň slouží jako kompenzace rozdílů emitorových napětí od pracovního bodu.



Můžeme si uvést vzorec pro výpočet výstupního napětí:

$$U_{výst} = (U_{E7} - U_{E8}) * \frac{R_{29}}{R_{28} + R_{29}} + U_{E8}$$

Po dosazení:

$$U_{výst} = \frac{0,18 * U_{CC} + 1,4}{2} + 0,41 * U_{CC} - 0,7 = \frac{U_{CC}}{2}$$

Pracovní bod koncového stupně je tedy nastaven v polovině napájecího napětí.

Po vzniku signálu na vstupní svorce zesilovače začne téct obvodem signálový proud I_{sig} , tento proud se sečte s proudem klidovým, a změní tak situaci v celém obvodu. Jelikož se jedná o emitorový sledovač, kterému jsme již určili zesílení $A_u=1$, bude nás zajímat především napětí na bázích tranzistorů. V závislosti na vstupním signálu se bude napětí na bázích obou tranzistorů měnit totožně, je tedy dostačující, i když odvodíme pouze jeden tranzistor.

Napětí na bázi tranzistoru Q8 je dáno poměrem odporu R_{26} a paralelní kombinací odporu R_{27} a vstupní impedance tranzistoru. Pro výstup naprázdno, tj. bez připojené zátěže bude situace následující:

$$I_{e\max} = \frac{U_{cc} - V_{ce}}{R_e} = \frac{7,625}{2} - 0,25 = \frac{3,5625}{10} = 356,21 \text{ mA}$$

$$I_{estr} = I_{e\max} * \frac{2}{\pi} = 226,77 \text{ mA}$$

$$I_b = \frac{I_c}{h_{21}} = \frac{227 \text{ mA}}{150} = 1,511 \text{ mA} ; \quad h_{11} = \frac{U_T}{I_b} = \frac{26 \text{ mV}}{1,511 \text{ mA}} = 17,2 \Omega$$

$$R_{vst} = h_{11} + (h_{21} + 1) * (R_e + R_z) = 17,2 + (151) * 100010 = 15,102 \text{ M}\Omega$$

Vstupní odpor tranzistoru se v tuto chvíli neuplatní, zesílení pro výstup naprázdno je tedy dáno pouze kombinací odporů R_{26} a R_{27} . Nebudeme-li uvažovat stejnosměrnou složku, přepíšeme uvedený vztah pro vstupní napětí, a následně pro napětí na bázi tranzistoru Q8.



$$U_{vst} = U_{sig}$$

$$U_{B8} = \frac{U_{vst} * R_{27}}{R_{26} + R_{27}} = \frac{U_{sig} * 22000}{26700} \doteq 0,82 * U_{sig}$$

Ve všech těchto vztazích figuruje emitorový odpor, který se skládá i s výstupní impedancí, bude-li tato impedance připojena, změní se rapidně vstupní odpor a tím i zesílení celého stupně. V ideálním případě, pro dosažení maximálních výsledků se impedance zátěže rovná výstupní impedanci zesilovacího stupně.

Spočteme si tedy výstupní odpor, ten se skládá z vnitřního odporu tranzistoru, ke kterému se přičte paralelní kombinace odporů na jeho vstupu, celé vyděleno proudovým zesilovacím činitelem, a připočteno s emitorovým odporem. Ačkoliv se ve výpočtu odpor R_{30} na výstupních svorkách příliš neuplatní, je pro úplnost uveden.

$$R_{vyst} = \frac{1}{\frac{1}{R_{30}} + \frac{1}{\frac{R_{26} * R_{27}}{R_{26} + R_{27}} + h_{11} + R_e}} = \frac{1}{0,00001 + \frac{1}{\frac{3872,7 + 17,2}{151} + 10}} = \frac{1}{0,00001 + \frac{1}{35,761}} =$$

$$= \frac{1}{0,00001 + 0,02796} = 35,748 \Omega$$

Budeme tedy vycházet z ideální situace, kdy na výstupní svorce bude připojena zátěž o této impedanci, a spočteme vstupní odpor tranzistoru a tudíž i napěťové zesílení.

$$R_{vst} = h_{11} + (h_{21} + 1) * (R_e + R_z) = 17,2 + (151) * (10 + 35,735) = 6,923 \text{ k}\Omega$$

$$U_{B8} = \frac{U_{vst} * \frac{R_{27} * R_{vst}}{R_{27} + R_{vst}}}{R_{26} + \frac{R_{27} * R_{vst}}{R_{27} + R_{vst}}} = \frac{U_{sig} * 5266}{4700 + 5266} \doteq 0,528 * U_{sig}$$

Vidíme tedy, že pokud připojíme na výstup zátěž o impedanci srovnatelné s výstupním odporem, bude napěťové zesílení přibližně poloviční.



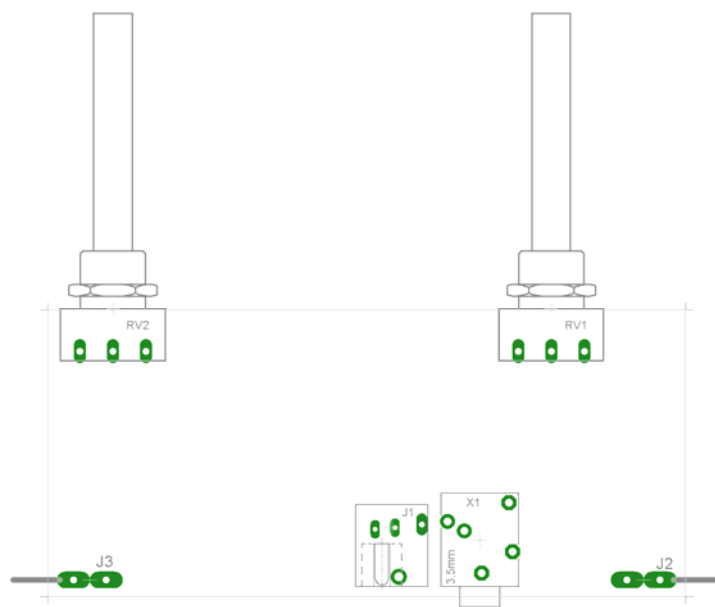
Konstrukce

Předpoklady, prostorové řešení.

Při konstrukci jakéhokoliv zařízení je cílem funkčnost, a v případě hudebního nástroje si pod tím nelze představit nic jiného, než samotnou hru. V případě tohoto nástroje hra spočívá v pohybu rukou kolem antén (viz.kapitola, strana), kterým musíme věnovat značnou pozornost více, než čemukoliv jinému. Další na řadě jsou prvky sloužící k ovládání nástroje, v našem případě dvojice potenciometrů RV_1 a RV_2 , poslední co bylo nutné řešit přednostně jsou konektory pro připojení přívodu elektrické energie a výstup signálu, jež je nástrojem produkován.

Rozmístění antén určuje především způsob hry, ze kterého jasně vyplývá umístění „Pitch“ antény na pravé straně, a „Volume control“ antény na levé straně. Pro potřebu upravit chování nástroje jsou v obvodu zařazeny již zmíněné potenciometry, pro lepší dostupnost byly tyto ovládací prvky umístěny na čelní stranu, každý potenciometr na straně antény, kterou ovlivňuje. Poslední v řadě jsou konektory, stejně jako je to u většiny přístrojů, i zde byl záměr umístit kabeláž někam, kde nebude na obtíž. Z předpokladu, že hudebník stojí vpředu nástroje vyplývá jako možnost umístit konektory do zadní části zařízení.

Během samotného návrhu se naštěstí nevyskytly žádné okolnosti, které by znemožnily uskutečnit plánovaný záměr. Rozmístění těchto součástí vyplývá z obr. 11.



Obr. 11

Plošné spoje

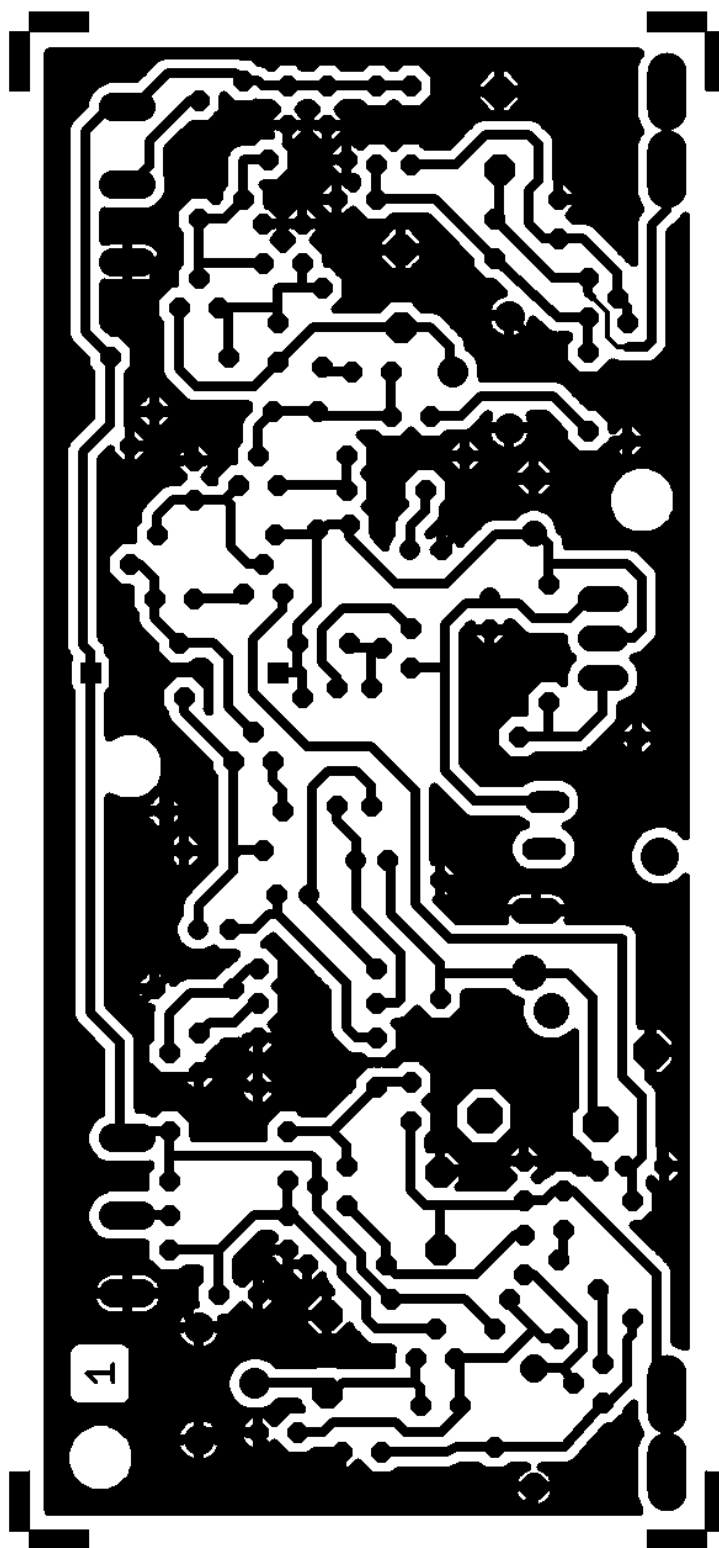
Postup návrhu

Úvodem považuji za podstatné sdělit, že veškeré úkony spojené s návrhem desky plošných spojů byly provedeny v „Light verzi“ systému EAGLE, jež je volně dostupná na stránkách vývojářů této aplikace (viz. použité zdroje).

Samotný návrh desky plošných spojů je principiálně jednoduchá záležitost. Základními myšlenkami by měly být jednoduchost a efektivita. Komplikace nastaly ve výběru součástek, kterých je v dnešní době nepřeberné množství. Ačkoliv hodnoty byly ve schématu určeny jednoznačně, jejich provedení se lišilo. Při výběru součástek bylo zapotřebí úzké spolupráce se zdrojem informací o dostupných provedeních a jejich rozměrech. V případě rezistorů byl tento problém téměř nepodstatný, jelikož bez ohledu na hodnotu se provedení neliší, u kondenzátorů a indukčností již byl tento problém větší, a spočíval především v rozteči vývodů. Největší problém spočíval ve výběru konektorů, v případě použití konektoru „Jack 3,5mm“ pro výstupní signál, nebyl vzhledem k jeho četnosti použití problém sehnat potřebná data. Komplikace se objevila v podobě napájecího konektoru, respektive v nedostupnosti dat. Bylo tedy nutné data nejprve vytvořit, což se na základě technické dokumentace s úspěchem podařilo.



Posledními kroky návrhu je uspořádání všech zbylých součástí a jejich propojení, tato operace vyžaduje velké množství času a znalost prostředí ve kterém je návrh realizován. Zde je nutné si uvědomit zejména technologické možnosti výrobce a předpokládaný postup osazování a pájení. V neposlední řadě hraje velkou roli v návrhu elektrická funkce s ohledem na proudovou zatížitelnost spojů, odvod tepla, elektromagnetickou kompatibilitu, přeslechy, zpoždění nebo impedanci. Vzhledem k povaze a funkci výrobku nebylo nutné věnovat pozornost všem těmto vlastnostem, nejzásadnější byla pouze proudová zatížitelnost jednotlivých spojů. Po propojení posledního spoje se přistoupí k finálním úpravám, zejména formátování desky, servisního potisku, nebo umístění ořezových a orientačních značek. Finální návrh vedení spojů v měřítku 2:1 včetně ořezových značek je k náhledu na obr. 12. Pro kompletní soubor všech výkresů viz. obrazovou přílohu (obr. 12-18).



Obr. 12 - (měřítko 2:1)



Výrobní proces

Je-li vlastní návrh plošných spojů dokončený včetně všech potřebných specifikací, můžeme přistoupit k výrobě. Na počátku celého výrobního procesu je příprava výrobních podkladů, takzvaných technologických dat, uvedu-li jako příklad tento výrobek, bude se jednat o formát pro fotoplotr GERBER 274-X a souřadnicovou vrtačku EXCELLON. Tato data se kompletují s objednávkovým listem, ve kterém jsou uvedeny všechny potřebné specifikace.

V tomto případě bylo zvoleno následující:

Počet vrstev: 2

Materiál: FR4 1,5mm 18/18um Cu

Technologie: Nepájivá maska; Servisní potisk; Žárový cín

Testování: Ne

Panelizace: Ne

Takto připravená data byla odeslána do firmy PragoBoard s.r.o. k dalšímu zpracování a výrobě. Zde jako první přichází na řadu kontrola dat a umístění orientačních značek, nejsou-li již v návrhu umístěny. V dalším kroku výrobního procesu se vykreslí filmové předlohy, to se provádí na fotoplotru, nejčastěji laserovým paprskem s vysokou přesností v měřítku 1:1. Následně se do připraveného materiálu vyvrtají otvory, které se galvanicky prokoví. Na povrch desky se nanese takzvaný fotorezist, což představuje světlocitlivou vrstvu. Na desku se podle orientačních značek přiloží film s motivem spojů, přes který se fotocitlivá vrstva osvítí. Po vyvolání a odplavení osvětleného laku zůstane na desce lakem tvořený motiv, vrstva mědi jež je zakrytá pod vrstvou laku je nyní chráněna, a nemůže reagovat během následujících procesů. Zde může být míněno leptání, při kterém se měď pod lakem nevyleptá, nebo častěji použitá metoda v profesionální výrobě, která představuje nanesení leptuvzdorného cínového rezistu, odstranění laku a vyleptání mědi jež není cínovým rezistem chráněna. Jak je vidět oba postupy se liší zejména tím, zda pracují s pozitivním nebo negativním motivem plošných spojů. Po dalším zpracování se deska testuje, bylo-li testování objednáno, a je na ni nanesena nepájivá maska, která se přes příslušný motiv osvítí, neexponovaná místa se odmyjí a zbylý lak se tepelně vytvrdí. Účelem nepájivé masky je chránit spoje před vnějšími vlivy a zamezit nežádoucímu zkratu mezi vodiči zakrytím míst, kam se nemá dostat pájka. Nyní se provede nanesení žárové pájky, celá deska se ponoří do tavidla a následně do vany s roztavenou pájkou, tím je zajištěna lepší pájitelnost a ochrana



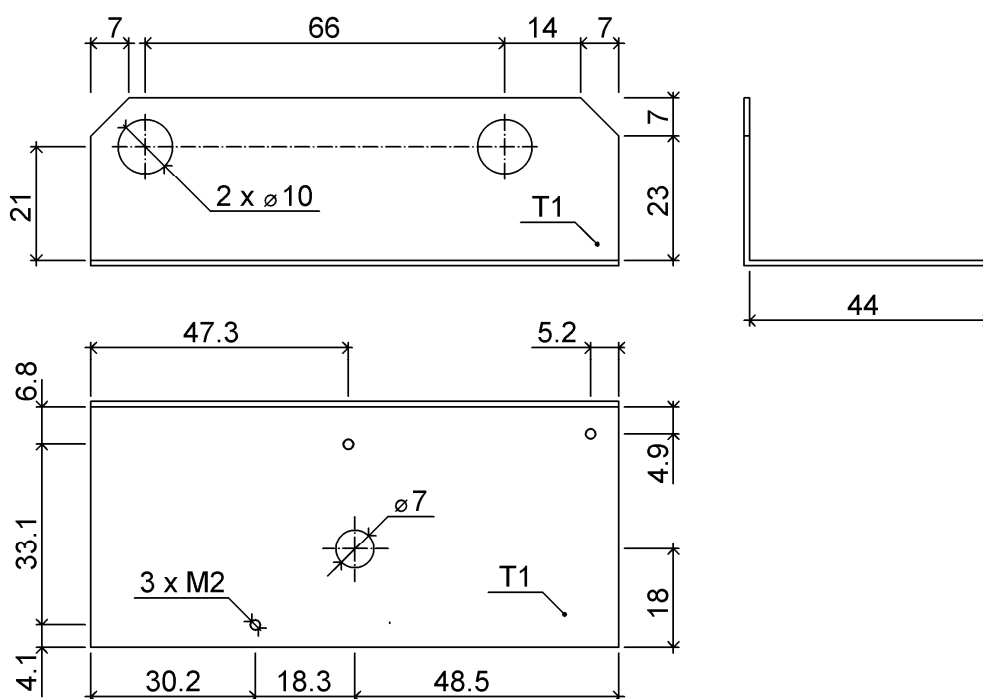
měděných pájecích plošek před vnějšími vlivy. Závěrem se na desku sítotiskem nanese servisní potisk a provede formátování na výsledný rozměr, pro jednoduché tvary se používají padací nůžky, pro jemnější opracování se obrys frézuje a v případě panelizace se obvod pouze vydrážkuje, desky se úplně oddělí až po osazení.

Příslušenství

Konstrukce

Ačkoliv tento prvek není nezbytně nutný pro správnou funkci, představa hry na nástroj položený bezprostředně na desce stolu je vcelku děsivá. Byla tedy navržena konstrukce pro připevnění na stativ.

Návrh se odvíjel téměř bezvýhradně s ohledem na funkci, zejména na následující požadavky: upevnění potenciometrů, upevnění desky plošných spojů, připevnitelnost na stativ a celková jednoduchost. Vznikl rám tvaru písmene „L“, jehož kratší hrana představuje čelo a jsou v ní upevněny potenciometry. V podstavě byly vyvrtány otvory pro připevnění desky plošných spojů a pro připevnění na stativ, nebo jiný nosný prvek. Tvar rámu je patrný z obr. 19



Obr. 19

Jako materiál byl použit hliníkový plech o tloušťce 1mm, ten byl opracován na požadovaný rozměr a tvar. Následně byly vyvrtány otvory pro potenciometry o průměru 10mm a otvory pro připevnění desky spojů o průměru 1,6mm do kterých byl později vyříznut závit. Jako poslední přišlo na řadu připevnění rámu k

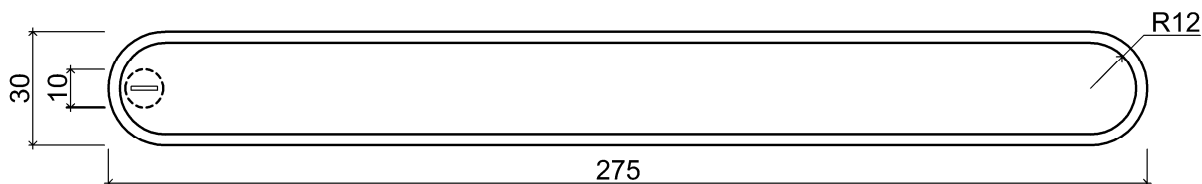
jinému prvku, pro univerzálnost byl zvolen otvor o průměru 7mm. Mezi deskou plošných spojů a rámem zbývá stále dost místa pro použití šroubů se zapuštěnou hlavou, nebo nízkoprofilových matek.

Postup při montáži je jednoznačný, na úplném začátku připevníme rám ke stativu, jelikož později by to nebylo možné, další na řadě je příprava distančních sloupků, osvědčila se smršťovací bužírka o průměru 6mm, která po zahřátí má průměr téměř poloviční, ale stěna je silnější. Z takto připravené bužírky ustříhneme tři sloupky o délce 7mm. Do desky plošných spojů vložíme tři šrouby se závitem M2, doporučená délka je 10 až 11mm, na které zespod nasuneme připravené distanční sloupky. Nyní opatrně, aby sloupky nespadly vložíme nástroj do rámu tak, aby osy potenciometrů procházely příslušnými otvory, nyní již distanční sloupky jsou na svém místě a nemohou vypadnout, s trochou trpělivosti zašroubujeme všechny tři šrouby, zatím však nedotahujeme. Na řadě jsou potenciometry, které na jejich místě zajistíme příslušnými matkami. Na závěr lehce dotáhneme všechny tři šrouby. Hra může začít...

Antény

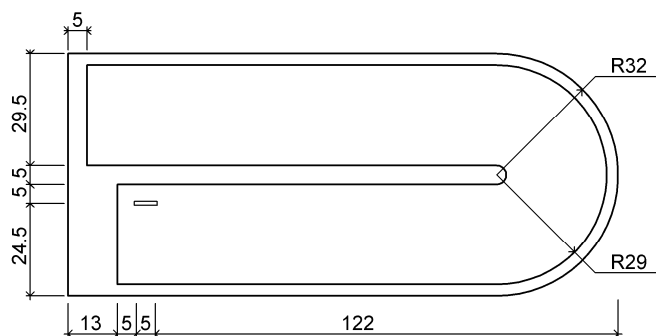
Ačkoliv byl návrh Arthura Harrisona konstruován na deskové antény, zvítězila snaha zachovat původní myšlenku prutových antén, a vznikl zajímavý kompromis.

Použitím prutových antén by nebylo možné dostatečně přeladit oscilátor kvůli jejich malé kapacitě, a to i přesto že byl původní návrh za tímto účelem přepočítán. Bylo nutné zvětšit plochu a přiblížit se tvarem k elektrodě deskového kondenzátoru. Jako tvar byl zvolen obdélník, jehož rohy byly zaobleny. Vzniklý ovál znázorněný na obr. 20 má již dostatečnou plochu pro správnou funkci.



Obr. 20

Anténa ovládání hlasitosti je standardně tvořena smyčkou, i zde byla snaha tento tvar dodržet. Principiálně byl tvar první antény přenesen a zahnut. Vše je patrné z obr. 21



Obr. 21

Samotné antény jsou vyrobeny jako plošný spoj, neboť materiál pro jeho výrobu je dostupný, cenově velmi přijatelný a především lehký a lehce opracovatelný. Motivy byly vzhledem ke své jednoduchosti vyrobeny poněkud netradičním postupem. Na měděnou vrstvu byla nalepena samolepící páska, na kterou se nakreslil požadovaný motiv, ten se následně ostrým nožem vyřízl. Plocha určená k odleptání byla zbavena lepící pásky, očištěna a následně vyleptána.

Tvar antén není v žádném případě rozhodující, neboť zde je vše závislé pouze na jejich ploše. Každý si tak může navrhnout vlastní tvar podle možností a dostupného materiálu.

Oživení přístroje

Byl-li tento hudební nástroj správně sestaven, měl by pracovat bez komplikací již na první spuštění. Po prvním uvedení přístroje do provozu je zapotřebí ho nastavit, to se provádí kapacitními trimry C_2 a C_{22} . Pohledem z předu přístroje je vlevo nastavení hlasitosti a vpravo výšky tónu. Pokud nastala situace, že po zapnutí nástroje není generován žádný tón nebo je v neslyšitelném pásmu, budeme se soustředit jako první na ovládání hlasitosti. Potenciometr RV_1 otočíme ve směru hodin do krajní polohy, potenciometr RV_2 otočíme přibližně doprostřed jeho dráhy. Nyní se budeme zabývat již zmíněnými trimry. Trimrem C_2 otáčíme v libovolném směru do té doby, dokud neuslyšíme jakýkoliv tón, nebo dokud neprovedeme otáčku o 360° , v tomto případě pootočíme i trimrem C_{22} a předchozí akci opakujeme. Nastala situace, kdy již je generován tón ve slyšitelném pásmu, nyní donastavíme hlasitost pootáčením trimru C_2 dokud nebude tón co nejhlasitější, tato situace může nastat během jedné otočky trimru pro více různých úhlů otočení, ale ne vždy je to právě hledaná pozice. Po nalezení pozice je nutné vyzkoušet správnou funkci, to provedeme přiblížením ruky k anténě. Pokud se přiblížení ruky neprojeví na amplitudě generovaného signálu, najdeme



jinou pozici s co nejvyšší hlasitostí. Po nastavení hlasitosti nastavíme i generování tónu. Potenciometr RV_2 je stále uprostřed své dráhy, pootáčením trimru C_{22} najdeme pozici kde tón je tak nízký, že téměř zaniká. Opět vyzkoušíme správnou funkci pohybem ruky okolo antény. Pokud jsme našli hledaný bod, nezbývá než si jen drobně doladit citlivosti s pomocí již zmíněných potenciometrů a začít hrát, přičemž pootáčením levého potenciometru v protisměru hodin se citlivost zvyšuje a obvod reaguje i na delší vzdálenost, pootáčením ve směru hodin se citlivost snižuje a naopak. Co se týče pitch antény, zde pootáčením potenciometru jemně měníme generovanou frekvenci, otočením ve směru hodin se frekvence snižuje, v opačném směru se frekvence zvyšuje.



Závěr

Seznam zdrojů, použité literatury a softwaru

Použitá literatura

- 1) Manuál technické dokumentace
5. přepracované vydání
Jiří Šťastný, Boleslav Třeštík a kol.
vydala Česká matice technická v nakladatelství KOPP
České Budějovice 2004

Seznam zdrojů informací na internetu

Teoretická část

<http://www.cerpadlabudejovice.cz/princip.htm>

<http://cs.wikipedia.org>

<http://en.wikipedia.org>

<http://www.thereminworld.com>

<http://www.theremin.info>

<http://www.thereminvox.com>

<http://www.theremin.navajo.cz>

<http://www.lydiakavina.com>

<http://www.harrisoninstruments.com>

<http://www.moogmusic.com>

<http://www.dejvickedivadlo.cz>

<http://www.uvnitr.cz/books/17.pdf>

Hardware

<http://www.ges.cz>

<http://www.gme.cz>

<http://www.alldatasheet.com>

<http://www.pragoboard.cz>

<http://www.cadsoft.de>

Software použitý při výrobě

- 1) EAGLE Layout editor
Verze 5.2.0 pro Windows
Light edition
Licence: #62191E841E-LSR-WLM-1EL



Copyright© 1988-2008 CadSoft

Seznam obrázků a příloh

Obrázky použité v textu

Obr. 1	Lev Sergejevič Těrmen	strana 6
Obr. 2	Lev Sergejevič Těrmen	strana 7
Obr. 3	Princip hry na theremin	strana 9
Obr. 4	Schéma stabilizátoru napětí	strana 13
Obr. 5	Schéma oscilátoru	strana 16
Obr. 6	Anténou laděný oscilátor, součet signálů	strana 17
Obr. 7	Průběh zázněje	strana 19
Obr. 8	Schéma obvodu ovládní hlasitosti	strana 20
Obr. 9	Schéma předzesilovače	strana 23
Obr. 10	Schéma koncového zesilovacího stupně	strana 25
Obr. 11	Rozmístění důležitých součástí	strana 29
Obr. 19	Tvar nosného rámu	strana 34
Obr. 20	Tvar „Pitch“ antény	strana 35
Obr. 21	Tvar „Volume control“ antény	strana 36

Obrázky v příloze

Obr. 12	Plošné spoje, pohled ze stany spojů	strana 31, 41
Obr. 13	Plošné spoje, pohled ze stany součástek	strana 41
Obr. 14	Motiv nepájivé masky ze strany spojů	strana 41
Obr. 15	Motiv nepájivé masky ze strany součástek	strana 42
Obr. 16	Servisní potisk ze strany součástek	strana 42
Obr. 17	Obrys desky, pohled ze strany součástek	strana 42
Obr. 18	Osazovací plán v měřítku 2:1	strana 43
Obr. 22	Schéma „RCA Theremin“ z roku 1929 bez části napájení	strana 44
Obr. 23a	Schéma „Theremin 144“ od Arthura Harrisona	strana 45
Obr. 23b	Schéma „Theremin 144“ od Arthura Harrisona	strana 45
Obr. 23c	Schéma „Theremin 144“ od Arthura Harrisona	strana 46

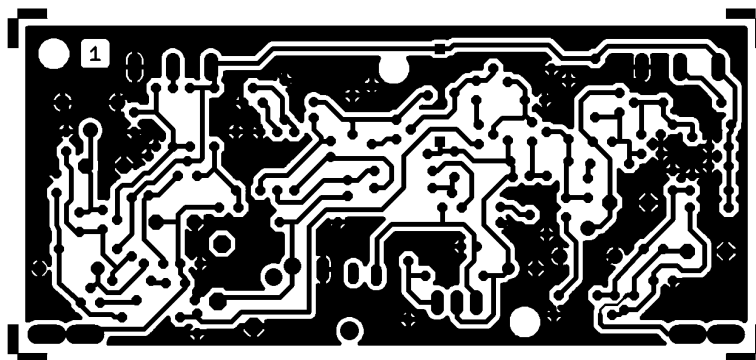


Seznam příloh

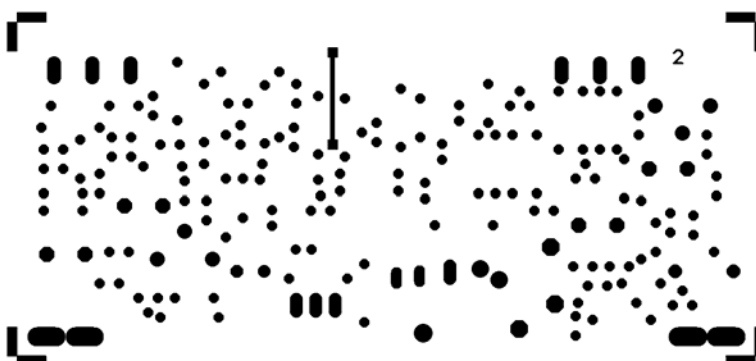
Attach 1	Seznam použitých součástek	strana 47
Attach 2	Výkres celého schématu	obal
Attach 3	CD	obal

Přílohy

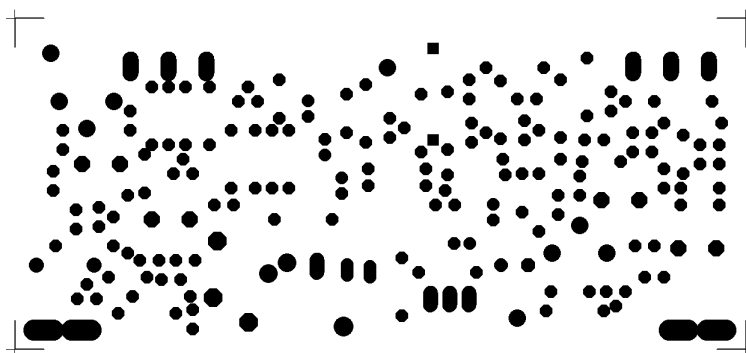
Obrázky, výkresy



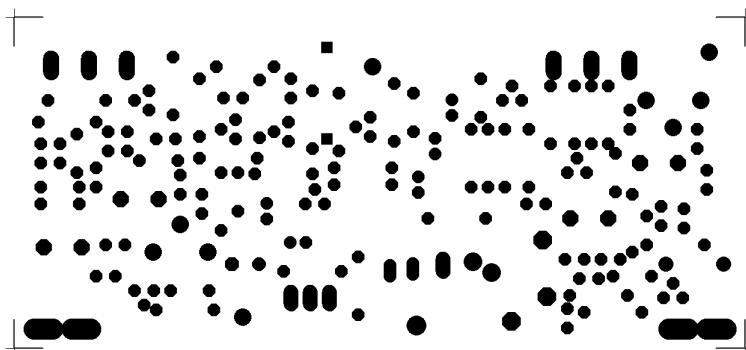
Obr. 12 - Plošné spoje, pohled ze stany spojů



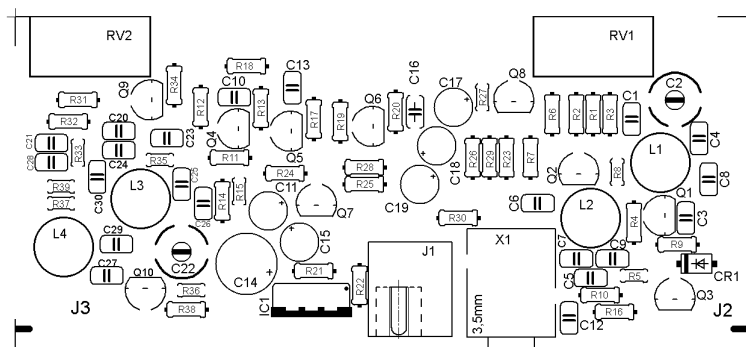
Obr. 13 - Plošné spoje, pohled ze stany součástek



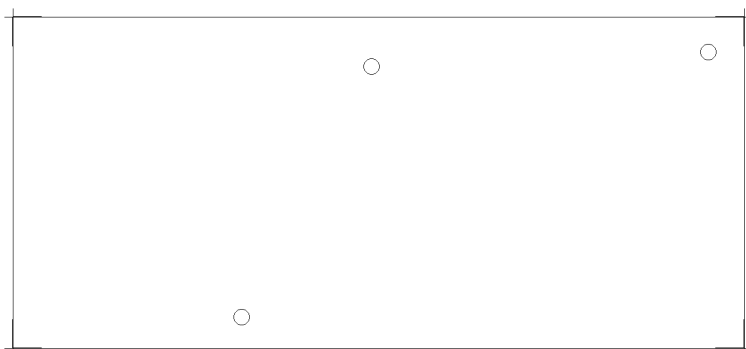
Obr. 14 - Motiv nepájivé masky ze strany spojů



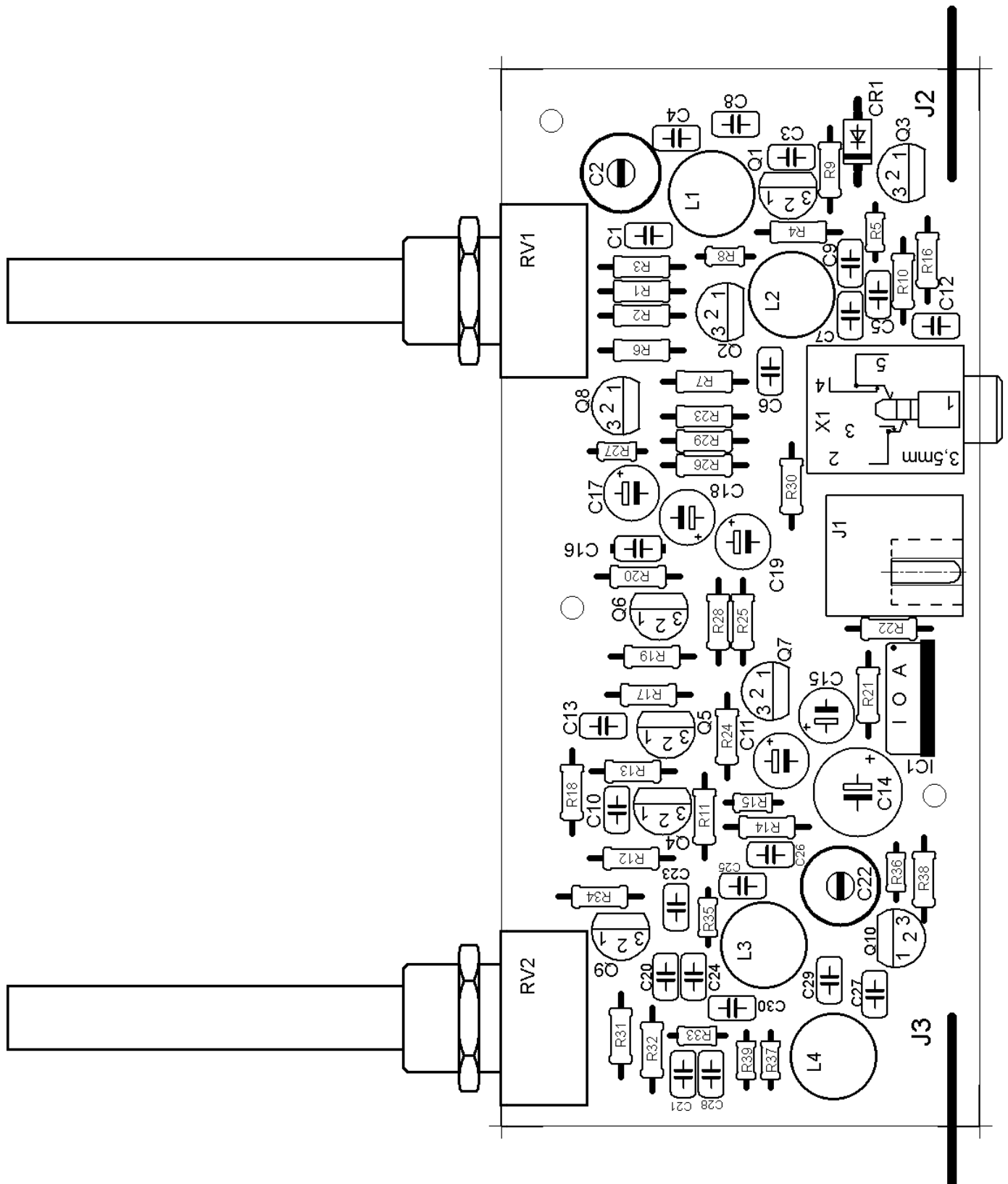
Obr. 15 - Motiv nepájivé masky ze strany součástek



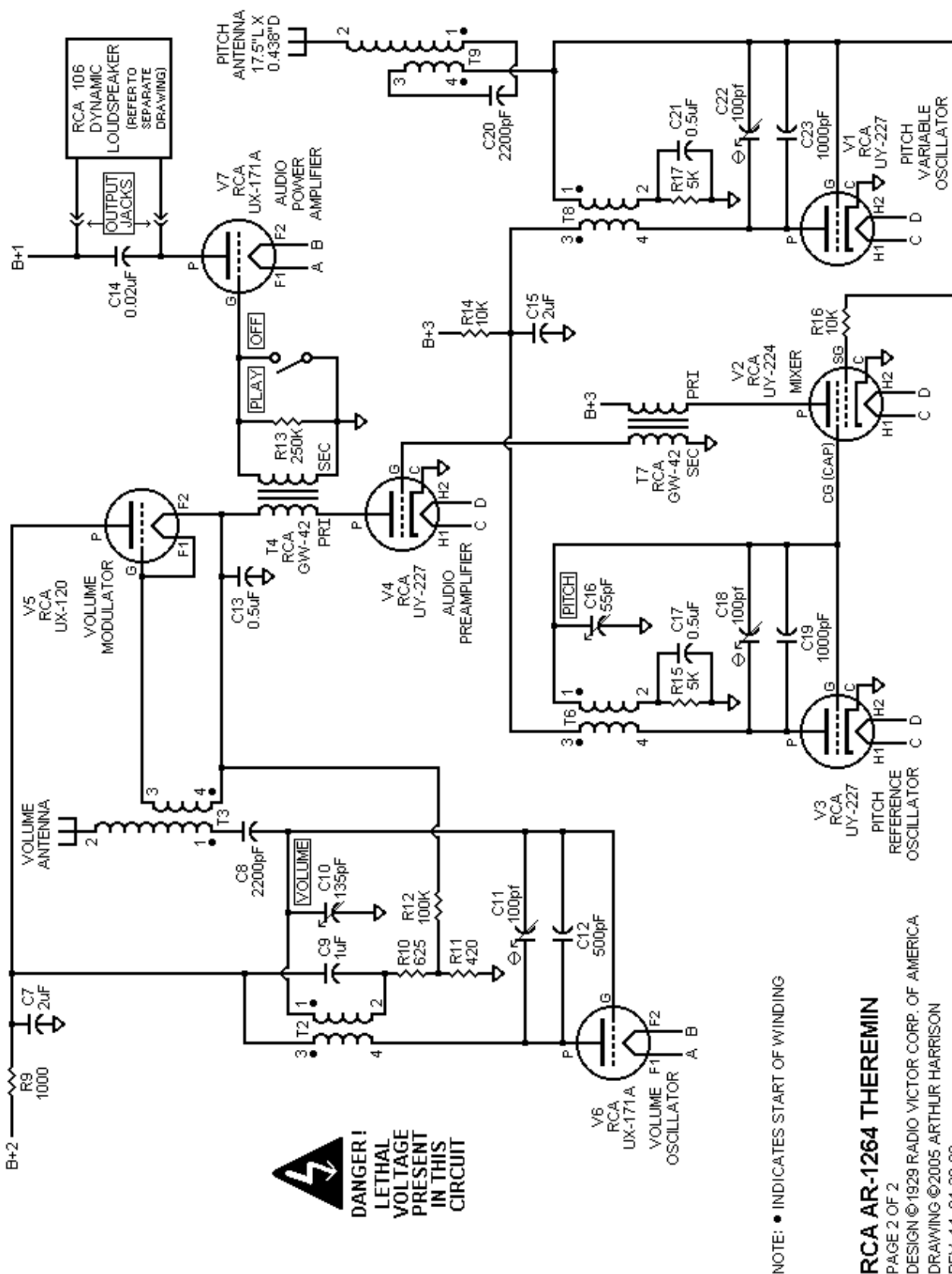
Obr. 16 - Servisní potisk ze strany součástek



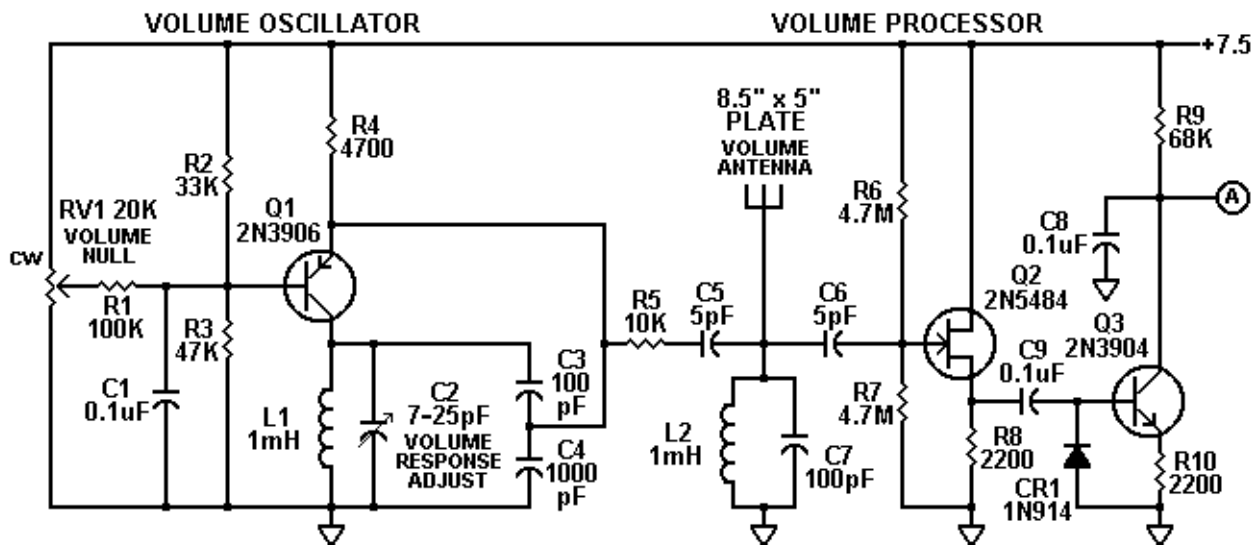
Obr. 17 - Obrys desky, pohled ze strany součástek



Obr. 18 - Osazovací plán v měřítku 2:1



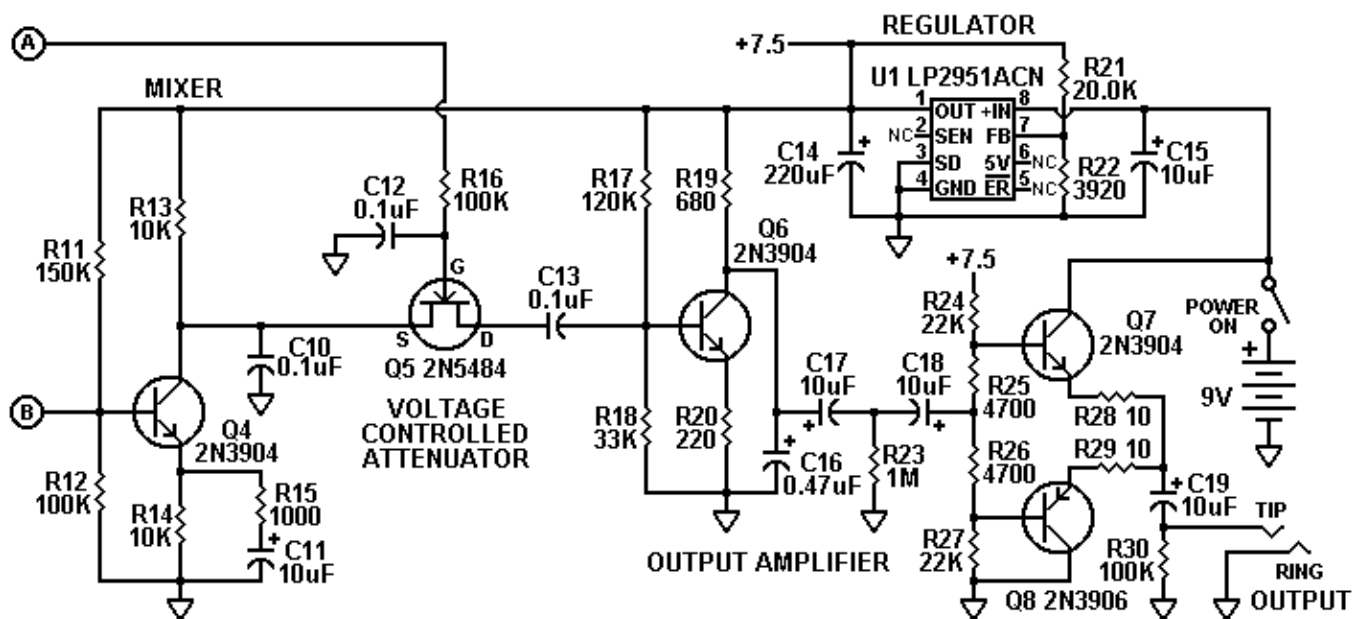
Obr. 22 - Schéma „RCA Theremin“ z roku 1929 bez části napájení



144 THEREMIN

PAGE 1 OF 3
06 FEBRUARY 1999
© 1998 BY ARTHUR HARRISON
REV. 1

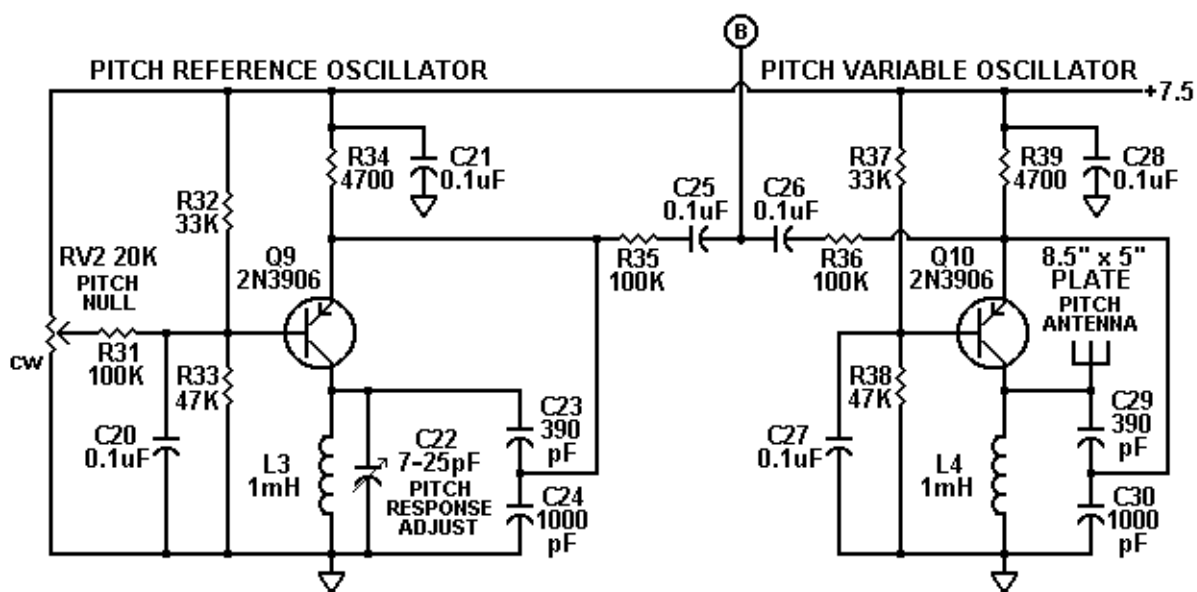
Obr. 23a - Schéma „Theremin 144“ od Arthura Harrisona



144 THEREMIN

PAGE 2 OF 3
19 OCTOBER 1998
© 1998 BY ARTHUR HARRISON
REV. 2

Obr. 23b - Schéma „Theremin 144“ od Arthura Harrisona



144 THEREMIN

PAGE 3 OF 3
06 FEBRUARY 1999
© 1998 BY ARTHUR HARRISON

REV. 1

Obr. 23c - Schéma „Theremin 144“ od Arthura Harrisona

**Attach 1**

Seznam osazených součástek:

Počet	Hodnota	Součástka	Označení
12	0,1uF	C-EU025-024X044	C1, C8, C9, C10, C12, C13, C20, C21, C25, C26, C27, C28
1	0,47uF	C-EU050-024X044	C16
1	1M	R-EU_0204	R23
1	1N5819	DO41-7	CR1
1	1k	R-EU_0204	R15, R21
4	1mH	TLEC24	L1, L2, L3, L4
1	1nF	C-EU025-024X044	C4
4	2N3904	TO92	Q3, Q4, Q6, Q7
4	2N3906	TO92	Q1, Q8, Q9, Q10
2	2k2	R-EU_0204	R8, R10
2	3-33pF	CKT 3-33PF	C2, C22
2	4M7	R-EU_0204	R6, R7
5	4k7	R-EU_0204	R4, R25, R26, R34, R39
2	4p7	C-EU025-024X044	C5, C6
1	5k1	R-EU_0204	R22
2	10R	R-EU_0204	R28, R29
3	10k	R-EU_0204	R5, R13, R14
5	10uF /25V	CPOL-EUE2-5	C11, C15, C17, C18, C19
2	22k	R-EU_0204	R24, R27
2	25k	PC16S	RV1, RV2
4	33k	R-EU_0204	R2, R18, R32, R37
3	47k	R-EU_0204	R3, R33, R38
1	68k	R-EU_0204	R9
7	100k	R-EU_0204	R1, R12, R16, R30, R31, R35, R36
2	100pF	C-EU025-024X044	C3, C7
1	120k	R-EU_0204	R17
1	150k	R-EU_0204	R11
1	220R	R-EU_0204	R20
2	220pF	C-EU025-024X044	C23, C29
1	220uF /25V	CPOL-EUE3.5-8	C14
1	680R	R-EU_0204	R19
2	680pF	C-EU025-024X044	C24, C30
2	BF245B	TO92	Q2, Q5
2	FS1573	12x16.2 ;6,3x0,8	J2, J3
1	LM317	TO220	IC1
1	SCD-016	NAP-V 2.1mm	J1
1	SCJ-0354	Jack-F 3.5mm S	X1



Epilog a celkové hodnocení

Během realizace projektu bylo zapotřebí řešit pouze minimální množství problémů, většinou se jednalo pouze o hledání vhodných součástek a jejich provedení. Po překreslení schematického návrhu do návrhářského prostředí programu EAGLE trvalo další desítky hodin zpracovat návrh plošných spojů do finální podoby.

Opomineme-li úsilí vynaložené na realizaci, vyčíslení samotné výroby můžeme rozdělit do jednotlivých fází. Na první fázi realizace, kterou můžeme popsat jako vývoj, bylo vynaloženo přibližně 420,- Kč. Tato částka zahrnuje konstrukci a testování jednotlivých funkčních celků, a proměřování nástroje jako takového. V této fázi realizace bylo nejvíce experimentováno s hodnotami a variantami součástek, a také zjištěn dostatek informací o chování jednotlivých celků. Ve druhé fázi, jež můžeme pojmenovat jako prototypování, byl zhotoven výsledný návrh, vyexportována data a vyrobeno prvních pár kusů desek plošných spojů, z nichž jedna byla osazena a oživena. Tato fáze si z finančních zdrojů vyžádala okolo 1 300,- Kč na výrobu plošných spojů včetně šablon, a dalších přibližně 290,- Kč na všechny součástky nutné pro osazení nástroje. Nastala-li by třetí fáze, nebo-li v tomto případě výroba dalších kusů, odvíjela by se cena od ceny jednotlivé desky spojů. Vzhledem k již vyrobeným šablonám by cena každého dalšího kusu neměla přesáhnout přibližně 150,- Kč za desku plošných spojů a již zmíněných 290,- Kč za veškeré součástky. S přihlédnutím k návratnosti vynaložených financí by se cena mohla začít pohybovat na hranici symbolických 499,- Kč. Žádná zde uvedená cifra však nezahrnuje další výdaje, jako například dovoz materiálů, amortizaci a opotřebení nástrojů, nebo výrobu rámu a antén.

Rozhodnete-li se pro stavbu, nebo třeba jen hru na tento hudební nástroj, nezbyvá než popřát hodně trpělivosti, štěstí a úspěchu.

S přáním pěkného dne

Staněk Jan ml.

