



ČVUT

FEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**MODULÁRNÍ
THEREMIN**

VYPRACOVAL:

GABRIEL SZABÓ

VEDOUCÍ PRÁCE:

MATĚJ HUŽVÁR

**KATEDRA
RADIOELEKTRONIKY**

2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Szabó** Jméno: **Gabriel** Osobní číslo: **510658**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Modulární theremin

Název bakalářské práce anglicky:

Modular Theremin

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je návrh a realizace thereminu s modulárním ovládáním a s výstupem ve vhodném digitálním formátu. Nejprve proveďte rešerši principu fungování thereminu a digitálních formátů vhodných pro daný problém. Na základě studie navrhnete složení modulů, ze kterých se výsledné zařízení bude skládat, přičemž ovládací moduly bude možno různě kombinovat a centrální modul bude mít výstup jak analogový, tak digitální ve formátu zvoleném na základě rešerše. Návrh nejprve ověřte pomocí simulace. Výsledné zařízení nakonec otestuje a zhodnoťte jeho funkčnost i případné nedostatky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Moog R., Build the em theremin, Electronic Musician, 1996
- [2] Paradiso J.A., Gershenfeld N., Musical applications of electric field sensing, Computer music journal, 1997

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Matěj Hužvár katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Matěj Hužvár
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu Ing. Matějovi Hužvárovi, za ochotu, trpělivost a všechen čas, který mi věnoval. Katedře radioelektroniky za poskytnuté zázemí a Bc. Janovi Hamacovi za několik dobrých nápadů a poznámek.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24. května 2024.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vysvětlením principů funkce bezdotykového hudebního nástroje theremin, založeného na směšování vysokofrekvenčních signálů, a následným návrhem, simulací a konstrukcí modulární verze thereminu, složené z jednotlivých analogových i digitálních částí, umožňujících změnu způsobu interakce s nástrojem, změnu výstupů a ovládání periferních zařízení. **Klíčová slova:** audio,

hudební nástroj, elektromagnetická pole, elektrické rezonátory, oscilátor, směšování signálů, heterodyning, Colpittsův oscilátor, MIDI, Raspberry Pi Pico, theremin

Abstract

This thesis focuses on explaining the functioning principles of the classical theremin, a contactless musical instrument based on heterodyning and demodulation of radio frequency signals. Furthermore, it focuses on the design and construction process of a modular theremin, consisting of both analog and digital parts, which change the way the theremin player interacts with the instrument and enable other inputs/outputs as well as control of other devices.

Keywords: audio, musical instrument, electromagnetic field, electric resonators, oscillator, signal mixing, heterodyning, Colpitts oscillator, MIDI, Raspberry Pi Pico, theremin

Obsah

1	Úvod	1
2	Teoretický popis	2
2.1	Princip hry na theremin	2
2.2	Funkční diagram thereminu	3
2.3	Antény	4
2.3.1	Tvary antén	5
2.3.2	Materiál antény	6
2.4	Oscilátory	7
2.4.1	Zpětnovazební oscilátory	7
2.4.2	Zpětnovazební RC osilátor	7
2.4.3	Zpětnovazební můstkový LC oscilátor	8
2.5	Směšování signálů	12
2.5.1	Multiplikativní směšování	12
2.5.2	Aditivní Směšování	13
2.6	Standard MIDI	15
2.6.1	MIDI spojení	15
2.7	Zprávy MIDI	15
2.7.1	Status byte	15
2.7.2	MIDI zprávy	15
3	Návrh modulárního thereminu	17
3.1	Napájecí modul	17
3.2	Tónový modul	18
3.2.1	Oscilátory	18
3.2.2	Směšovací obvod	21
3.3	Hlasitostní modul	23
3.4	Směšovací modul	24
3.5	μC modul	26
3.5.1	Načítání dat	26
3.5.2	FFT a zpracování signálu	26
3.5.3	Získání frekvence	27
3.5.4	Lokální webový server	29
3.5.5	Webová stránka	30
3.5.6	Dvoujádrový běh	30
3.6	Zapouzdření thereminu	31
3.6.1	Univerzální krabičky	32
3.7	Realizovatelná zapojení	33
3.7.1	Čistě analogové zapojení	33

3.7.2	Analogově-digitální zapojení	33
3.7.3	Digitální zapojení	34
3.7.4	Napětově řízené digitální zapojení	34
3.8	Antény	35
3.8.1	Tyčové antény	35
3.8.2	Planární antény	36
3.8.3	Sférická anténa	36
3.8.4	Zhodnocení antén	37
4	Realizace	38
4.1	Realizace tónového modulu	39
4.1.1	Antény tónového modulu	40
4.2	Realizace hlasitostního modulu	41
4.3	Realizace směřovacího modulu	42
4.4	Realizace napájecího modulu	44
4.5	Realizace μ C modulu	45
4.6	Testovací destička	46
4.7	Vlivy DPS a parazitních kapacit	47
5	Závěr	48
A	Přiložené soubory	52

Kapitola 1

Úvod

V současné době je svět elektronické hudby velmi rozmanitý. Prvním široce rozšířeným elektronickým nástrojem je theremin. Unikátně znějící hudební nástroj, založený na bezdotykovém ovládní, jehož vynálezcem je ruský vědec León Theremin. V průběhu mnoha let od svého stvoření se theremin velmi rozšířil a nejen díky svému unikátnímu kvílení se objevuje v mnoha hudebních stylech.

Ve světě elektronických hudebních nástrojů se stále více prosazují modulární systémy, které umožňují kombinovat a propojovat různé zvukové moduly a vytvářet tak unikátní zvukové kompozice. Nikoliv však u thereminu, některé thereminy sice umožňují řízení externích zvukových syntetizátorů, ale tam cesta většinou končí. V současné době neexistuje koncept modulárního thereminu, který by si mohl umělec přizpůsobit podle svého vkusu. Existuje sice poměrně velká základna nadšenců stavějících si podomácku vyrobené thereminy, ale ti se nejčastěji zaměřují na návrh vlastních obvodů nikoliv však na zásadní změnu ovládní thereminu a modularitu.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a realizovat modulární theremin, který poskytne uživatelům široké možnosti individualizace a rozšíření zvukových funkcí. V rámci práce se zaměřím na koncept modulárního thereminu, návrh několika jeho modulů a jejich realizaci.

Kapitola 2

Teoretický popis

2.1 Princip hry na theremin

Theremin je jeden z nejunikátnějších hudebních nástrojů. Jeho ovládání na rozdíl od většiny hudebních nástrojů nevyžaduje fyzický kontakt s žádnou částí nástroje. Hráč pouze pohybuje rukama v okolí dvou antén, tím mění hlasitost a výšku tónu, který theremin vydává. Děje se tak pomocí proměnné kapacity mezi hráčem a anténami, více v sekci 2.3. Jak už bylo výše zmíněno, theremin má obvykle dvě antény. Jednu vertikální, která ovládá výšku tónu a druhou horizontální, ovládající jeho hlasitost. Typické nastavení antén je takové, že tón je nejvyšší blízko u antény a klesá při vzdalování. U hlasitostní antény je to naopak. S rukou daleko od antény je hlasitost největší, s přibližováním ruky k anténě se hlasitost snižuje, až se úplně utlumí při přiložení ruky na anténu.[1]

Teoreticky je hra na theremin velmi jednoduchá, jenže má svá omezení, která zásadně promění principy hry na theremin.

Prvním omezením je limitovaná rychlost změny hlasitosti a tónu, která je způsobená spojitým chováním ovládání hlasitosti i tónu. Což znamená, že se ovládání nechová jako spínač s polohami zapnuto a vypnuto popř. tón 1, tón 2., ale jako spojitá škála. Výsledkem tohoto chování je, že při přesunu mezi dvěma hodnotami A a B, tónu či hlasitosti, projde ruka i všemi hodnotami mezi A a B. Tento efekt jde v jisté míře odstranit u tónu, jelikož hráč může na začátku přechodu mezi dvěma tóny snížit hlasitost a na konci přechodu hlasitost zvýšit na původní hodnotu. Nicméně u hlasitosti tento efekt jde zamaskovat pouze velmi rychlými pohyby ruky. Rychlé velké změny hlasitosti jsou však obtížné a přidávají k obtížnosti hry na theremin. Obecně je hra na theremin plynulejší, než na jiné klasické hudební nástroje.[1]

Druhé omezení taktéž souvisí se spojitým chováním thereminu. Jedná se o fakt, že na rozdíl od velké části hudebních nástrojů nemůže theremin hrát víc jak jeden tón.

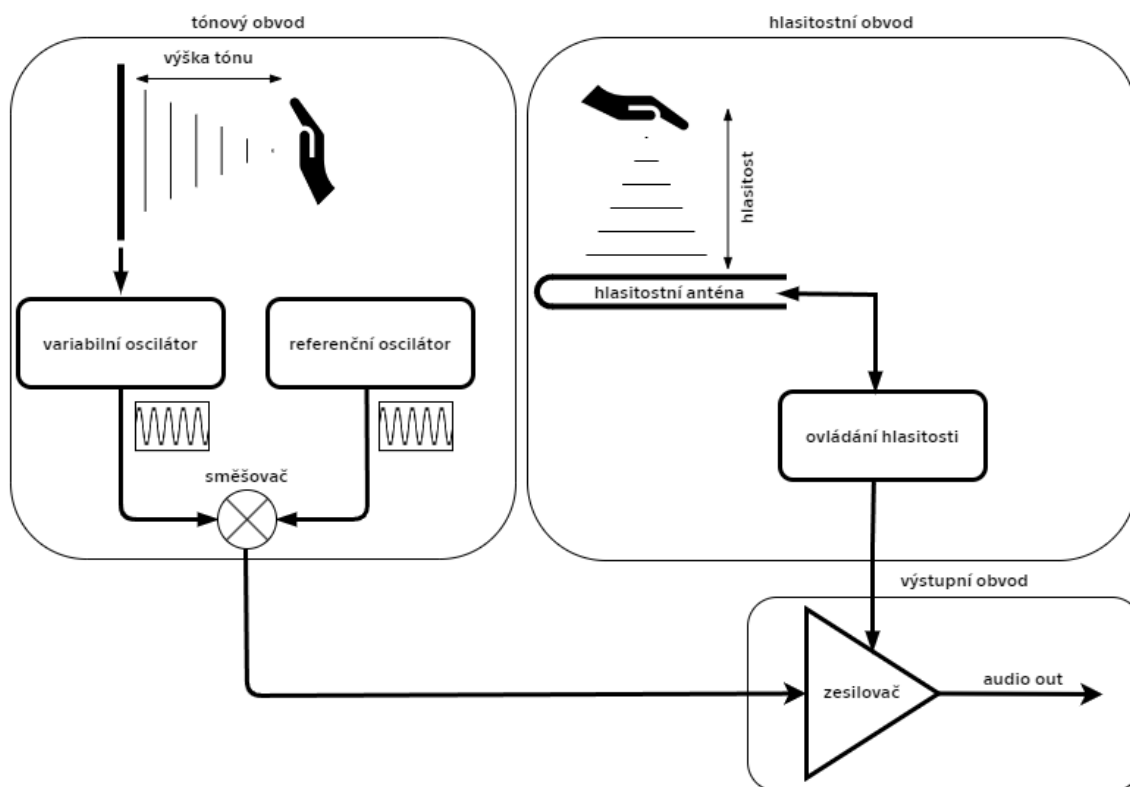
Posledním omezením jsou vlivy okolí. Antény thereminu bývají velmi citlivé a objekty v okolí, jako je například nábytek, stojany na mikrofony či ostatní muzikanti nebo dokonce i sám hráč ovlivňují výsledný tón. Kvůli této citlivosti je potřeba nástroj vždy před vystoupením naladit a ideálně držet dostatečný odstup od dalších členů orchestru či kapely.[1][2]

2.2 Funkční diagram thereminu

Druhů thereminů je mnoho. Všechny však mají velmi podobnou strukturu. Na obrázku 2.1 je vidět typické blokové schéma thereminu. Theremin se obvykle skládá ze tří částí. Tónového, hlasitostního a výstupního obvodu.

Tónový obvod

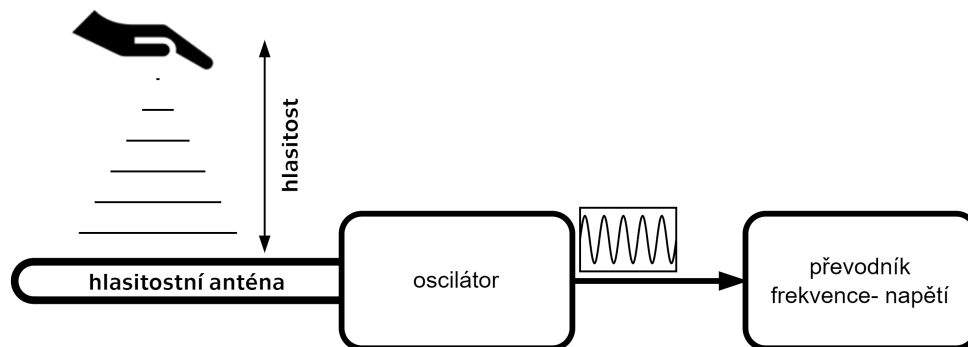
Hlavní částí thereminu je tónový obvod, který obsahuje dva oscilátory. Referenční oscilátor drží stálou frekvenci a ladí se před samotnou hrou na theremin. Variabilní, nebo také proměnný oscilátor umožňuje modulování své frekvence v závislosti na proměnné kapacitě kondenzátoru, který představuje kapacitu mezi hráčem a tónovou anténou. Tónový obvod se mimo oscilátoru a antén skládá ze směšovače či jiného obvodu umožňujícího odečtení signálů z dvou oscilátorů, tak aby se výsledný signál pohyboval ve slyšitelném spektru 20 Hz až 20 kHz. [3][4][2][5]



Obrázek 2.1: Základní funkční diagram thereminu

Hlasitostní obvod

Druhou částí je hlasitostní obvod, který funguje jako převodník kapacita - napětí. Příkladem může být kapacitně řízený oscilátor podobný jako u tónového obvodu (2.2) spolu s převodníkem frekvence - napětí viz obr. 2.2. Některé thereminy však hlasitostní obvod neobsahují. V tom případě se můžou označovat jako „pitch-only”. Takovéto thereminy drží v určitém rozmezí stejnou amplitudu výstupního signálu, která se sníží až při dostatečném vzdálení ruky (snížení frekvence blízko k nule, kde dochází k odfiltrování stejnosměrných signálů).



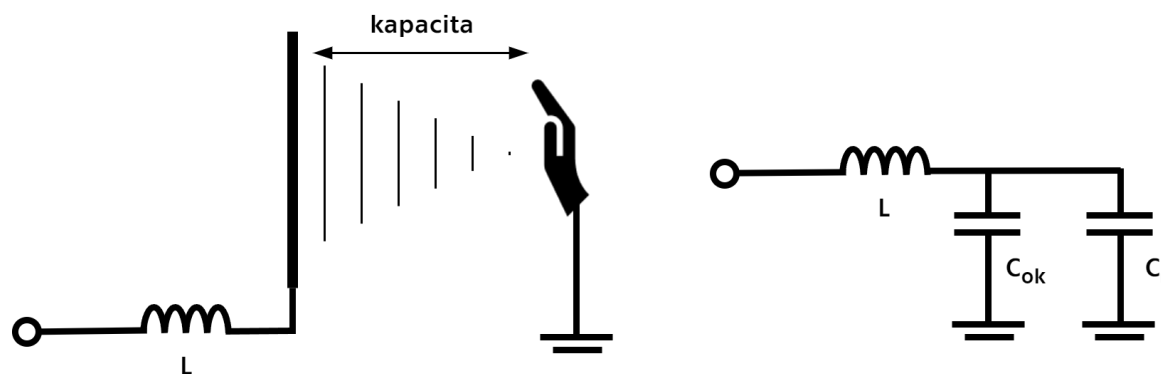
Obrázek 2.2: Schéma hlasitostního obvodu s převodníkem frekvence - napětí

Výstupní obvod

Poslední hlavní částí typického thereminu je výstupní obvod. Ten zesiluje výstupní signál z tónového obvodu v závislosti na signálu z hlasitostního obvodu. Umožňuje tak napojení thereminu na analogový vstup reproduktorů, sluchátek či jiného výstupního zařízení. [6][5]

2.3 Antény

Antény jsou nejvýraznějším rysem každého thereminu. Faktem je, že se však nejedná o antény v pravém slova smyslu, nýbrž o elektrody pomyslného kondenzátoru, jehož druhou elektrodou je hráč, představující z pohledu obvodu zem. Obecné náhradní zapojení můžete vidět na diagramu v obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Náhradní obvod antény

Na obrázku 2.3 značí L sériovou indukčnost k anténě, C_{ok} je kapacita vůči okolí a C_r je kapacita mezi anténou a rukou hráče.

Indukčnost L se přidává k anténě, aby potlačila rušení a pro vytvoření rezonančního LC obvodu s kapacitou antény [6]. Rezonance na anténě zvětší amplitudu kmitání ve frekvencích okolo rezonanční frekvence. V případě, že se jedná o hlasitostní anténu, se může tohoto faktu využít pro prakticky přímý převod kapacita - napětí. C_{ok} je celková

kapacita vůči prostředí. Není do ní započítána kapacita vůči ruce hráče C_r , ale kapacita zbytku těla hráče, ostatních částí thereminu a dalších objektů v okolí.

U Etherwave thereminu se podle Boba Mooga [4] pohybuje okolo 10 pF až 15 pF. Zbývá tedy kapacita C_r , která se pohybuje v řádech desetin pF. Celková kapacita C se tedy rovná paralelní kombinaci

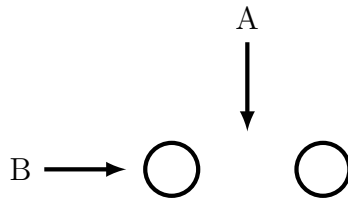
$$C = C_r + C_{ok}. \quad (2.1)$$

2.3.1 Tvary antén

Na celkové kapacitní vlastnosti má velký vliv tvar antén.

Nejčastější jsou antény tyčové. U těchto antén vychází elektrické pole kolmo z antén a vytváří tak válcové elektrické pole, které umožňuje díky své směrovosti umístění dvou na sebe nezávislých antén. Tyčové antény jsou taktéž velmi jednoduché na výrobu a převoz. Nevýhodou tyčových antén je však jejich malá plocha, způsobující rychlý útlum elektrického pole v závislosti na vzdálenosti. I z tohoto důvodu mívají antény kvalitnějších thereminů průměr větší než 1 cm. U modelů zaměřujících se na malý rozměr se objevují i teleskopické rádiové antény. Ty však vykazují neideální vlastnosti právě kvůli svému malému povrchu.

U většiny thereminů se vyskytuje i ohnutá hlasitostní anténa. Jedná se taktéž o tyčovou anténu, která je ale ohnutá tak, aby znásobila svoji plochu a tím svoji citlivost. Anténa vykazuje větší linearitu změny kapacity ze směru A a chování podobné nezahnuté anténě ze směru B. Je tedy možné v průběhu hry měnit rychlost změny hlasitosti. Nevýhodou tyčových antén může být také větší náchylnost na rušení z okolí, ta je ale většinou zanedbatelná.



Obrázek 2.4: Diagram pozic vůči hlasitostní anténě

Jelikož jsou antény thereminu, jak je výše zmíněno spíše elektrodami, mohou nabývat i tvarů pro antény netypických. Jedním z těchto neobvyklých tvarů může být třeba i jednoduchá plocha jako například u přístroje "Matryomin" vestavěného do ruské Matrjošky.[7] Kapacita se v tomto případě spočítá jako kapacita deskového kondenzátoru,

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \quad (2.2)$$

kde C je kapacita, ε_0 je permitivita vakua, ε_r relativní permitivita, A je plocha desek kondenzátoru a d je vzdálenost mezi deskami.

U nekonečně velké desky se kapacita se vzdáleností mění lineárně v poměru $\frac{1}{d}$. Nicméně u konečné velké desky se projeví okrajové efekty, které způsobí nelineární chování.

Deskové antény v reálných podmínkách lineárnější než tyčové, ale jejich vlastnosti jsou horší v blízkosti okrajů, výhodou může být i nulové vzájemné rušení v případě, že jsou obě desky v jedné rovině.

Tyčové a ploché antény ovšem nejsou jedinými možnými realizacemi. Hlavně u "pitch-only" thereminu se fantazii meze nekladou.

Zajímavým příkladem je umělecká realizace "Theremin Bollard"[8] tvaru patníku, jehož celý povrch je anténou.

2.3.2 Materiál antény

Na rozdíl od tvaru, nemá materiál zásadní vliv na vlastnosti thereminu. Důležité je jen zda se jedná o vodivý kov. Typicky se používají kovy s velkou měrnou vodivostí. Příkladem mohou být kovy v tabulce 2.1. Výrobci upřednostňují různé provedení. Například The Minimum Theremin používá anténu ze slitiny hliníku, Open.Theremin používá postříbřenou hliníkovou slitinu, Etherwave theremin používá poniklovanou mosaz a Bob Moog nabádá ve svém návodu "Build the EM Theremin"[6] k použití měděných trubek. Je tedy vidět že výrobcům příliš nezáleží na elektrických vlastnostech jednotlivých kovů nýbrž na jejich vlastnostech vizuálních a mechanických.

kov(slitina)	měrná elektrická vodivost σ[S/m]
stříbro	$6.8 \cdot 10^7$
měď	$6.0 \cdot 10^7$
zlato	$4.3 \cdot 10^7$
hliník	$3.8 \cdot 10^7$
železo	$1.0 \cdot 10^7$
uhlíková ocel	$0.6 \cdot 10^7$
korozivzdorná ocel	$0.2 \cdot 10^7$

Tabulka 2.1: Hodnoty měrné elektrické vodivosti vybraných kovů a slitin při pokojové teplotě

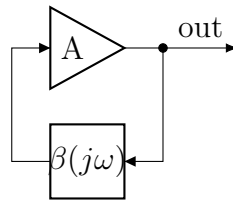
[9]

2.4 Oscilátory

Nepostradatelnou součástí thereminu jsou kromě antén oscilátory. Oscilátory jsou obvody generující ze stejnosměrného napájecího napětí harmonický signál. V případě thereminu je ideální, použití signálu se sinusovým průběhem. Ten při směšování negeneruje velké množství nechtěných harmonických složek. Zaměřím se tedy na harmonické oscilátory.

2.4.1 Zpětnovazební oscilátory

Jednoduchý zpětnovazební oscilátor se skládá ze dvou prvků: zesilovače a rezonančního obvodu 2.4.3 ve zpětné vazbě o přenosu β zapojeného jako zpětná vazba. Rezonanční obvod určuje frekvenci kmitání, toto kmitání se zesílí a sečte s přirozeným kmitáním rezonátoru.



Obrázek 2.5: Zpětnovazební oscilátor [10]

Pro rozkmitání reálného oscilátoru pak musí platit Nyquistovo kritérium

$$A(j\omega)\beta(j\omega) > 1.$$

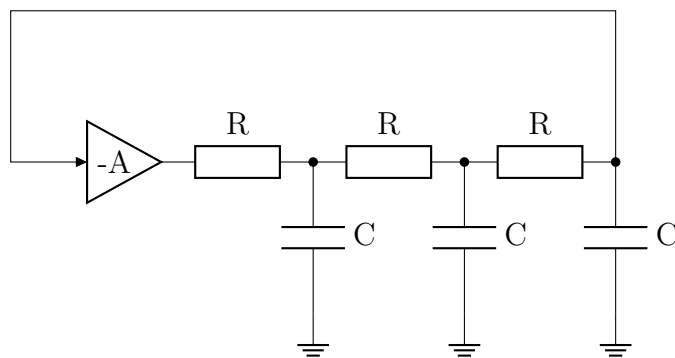
Jinými slovy, smyčka obsahující zesilující člen A a zpětnovazební člen β musí vykazovat zisk. V takovémto případě se bude amplituda oscilací zvyšovat, dokud nenarazí na napájecí napětí zesilovače popř. jiný limitující faktor.[10]

Důležitým faktorem pro návrh oscilátoru je i fázový posun rezonančního obvodu a zesilovače. Je nutnou podmínkou, aby byl záskmit rezonátoru a zesílený signál z oscilátoru ve stejné fázi, kdyby tomu tak nebylo, signály by se odečetly a došlo by k utlumení kmitání. [10][11]

2.4.2 Zpětnovazební RC oscilátor

Jedním z možných zapojení může být série tří RC low-pass filtrů (dolních propustí), o konečném útlumu, které posunou fázi signálu o $3 \times 60^\circ$, což se rovná celkovému posunu 180° , když je signál přiveden na invertující vstup operačního zesilovače, otočí se jeho fáze o zbylých 180° . [11]

Takovéto provedení je však nevhodné pro použití v thereminu, hlavním důvodem je nevhodnost RC oscilátorů pro použití na vysokých frekvencích z důvodu, že se jedná v podstatě o integrátor.



Obrázek 2.6: Zpětnovazební oscilátor s fázovým posunem [10]

2.4.3 Zpětnovazební můstkový LC oscilátor

Jak píše doc. Hospodka v [10] "Můstkové oscilátory využívají kladnou $\beta^+(j\omega)$ i zápornou $\beta^-(j\omega)$ zpětnou vazbu, přičemž pouze jedna z nich je kmitočtově závislá tak, aby jednoznačně určovala kmitočet oscilací ω_0 " [10]

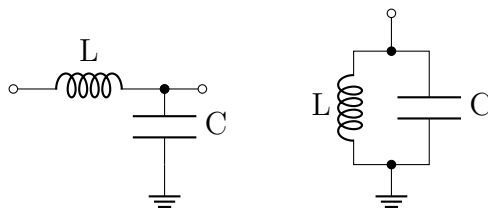
Je tedy vždy aplikována jedna ze dvou možností. Buďto je do kladné zpětné vazby přiveden rezonanční obvod, chovající se jako band-pass (pásmová propust), nebo je do záporné zpětné vazby přiveden rezonanční obvod s vlastnostmi pásmové zadržky. [10]

V obou případech pak musí platit pravidlo nestability, které udává, že pro rezonanční frekvenci musí být frekvenčně závislá modulová charakteristika $|\beta(j\omega)|$ větší než frekvenčně nezávislá $|\beta_0|$. [10]

Jak už z minulé kapitoly vyplývá, nejsou pro použití v thereminu vhodné RC oscilátory tedy ani Wienův můstkový oscilátor. [11]

LC rezonátor

Nejjednodušší zpětnou vazbou využívající prvky LC je obyčejný LC rezonátor. Ve zpětné vazbě se používá paralelní kombinace cívky a kondenzátoru, jejíž výsledné vztahy jsou analogické pro zapojení sériové, na kterém je lépe vidět jejich odvození. [10]



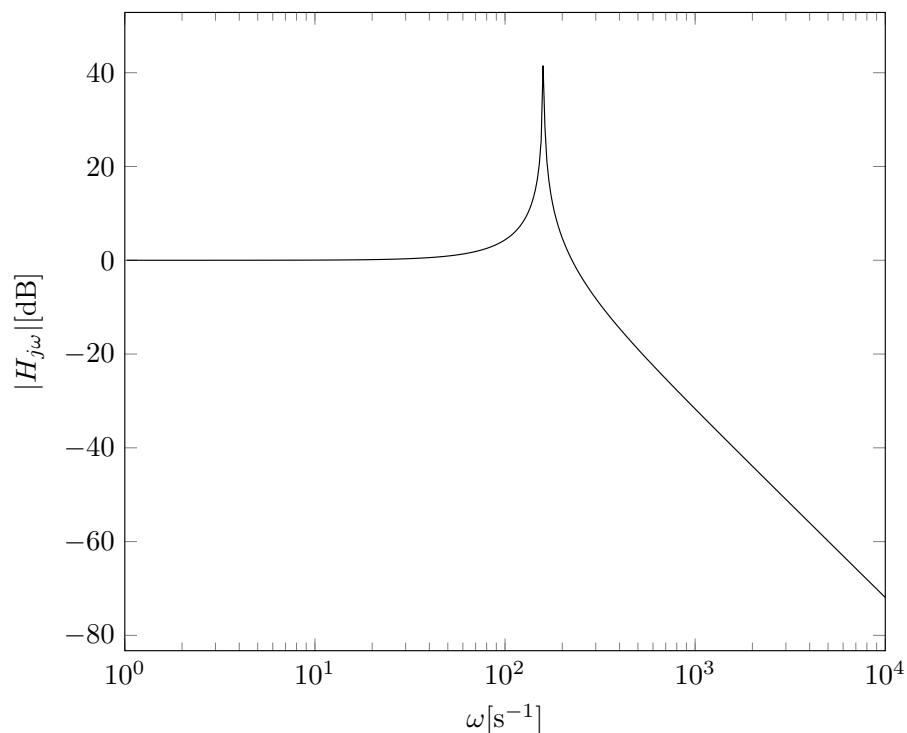
Obrázek 2.7: Schéma sériového a paralelního zapojení LC rezonátoru

Ze sériového LC je možné jednoduše odvodit frekvenční charakteristiku

$$H(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC}, \quad (2.3)$$

ze které jde jednoduše odvodit vztah pro rezonanční kmitočet ω_{rez} , pro který se rovná jmenovatel frekvenční charakteristiky nule.

$$\omega_{\text{rez}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.4)$$



Obrázek 2.8: Graf kmitočtové charakteristiky ideálního LC rezonátoru

Rezonanční frekvenci je taktéž možné vyčíst z grafu. Jelikož se jedná o kořen jmenovatele, vytvoří se na rezonanční frekvenci vrchol.

Jedinou nevýhodou jednoduchého LC rezonátoru je fakt, že otáčí fázi signálu pouze o 90° . Aby se mohlo dosáhnout posunu o 180° , je nutné použití obvodu se třemi či více LC prvky. Nejznámějšími oscilátory, používajícími tři a více prvků LC prvky, jsou oscilátory Hartleyho, Clappův a Colpittsův. Jedná se o dobře přeladitelné oscilátory řízené typicky proměnnou kapacitou, které jsou velmi jednoduché. Až na Clappův oscilátor se jedná o poměrně nestabilní oscilátory.[10] [11]

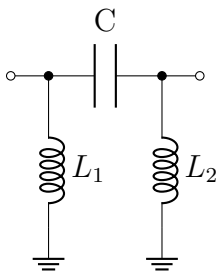
Následné popisy platí pro zapojení rezonátorů do zpětné vazby operačního zesilovače.

Hartleyho oscilátor

Hartleyho oscilátor obsahuje zesilovač, který má ve zpětné vazbě dvě cívky a jeden kondenzátor v následující konfiguraci.[11]

Rezonanční kmitočet se vypočítá velmi podobně jako u jednoduchého LC rezonátoru 2.3, kde

$$L = L_1 + L_2. \quad (2.5)$$

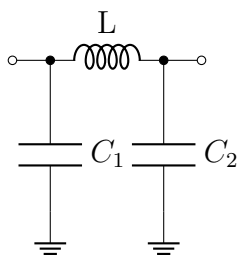


Obrázek 2.9: Zpětnovazební obvod Hartleyova oscilátoru

Colpittsův oscilátor

Colpittsův oscilátor je praktický stejný jako oscilátor Hartleyův s rozdílem, že na místě kondenzátoru je cívka a na místě cívek jsou kondenzátory. [10][11] Rezonanční kmitočet se vypočítá stejně jako u Hartleyova oscilátoru ze stejného vzorce jako pro LC rezonátor s rozdílem, že

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (2.6)$$



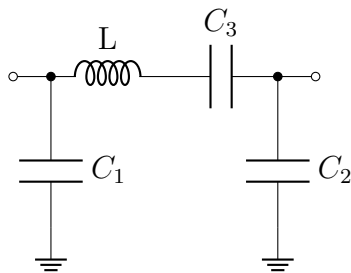
Obrázek 2.10: Zpětnovazební obvod Colpittsova oscilátoru

Clappův oscilátor

V případě Clappova oscilátoru se jedná v podstatě o Colpittsův oscilátor s rozdílem, že cívka má v sérii zapojený třetí kondenzátor.[11] Pro Clappův oscilátor pak platí analogický vztah pro rezonanční kmitočet

$$\omega_{rez} = \frac{1}{\sqrt{L(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3})}}. \quad (2.7)$$

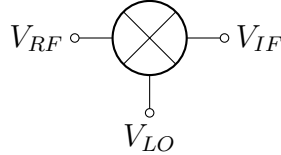
Clappův oscilátor je stabilnější než výše zmíněné oscilátory [11], není tedy tak vhodný pro použití v thereminu.



Obrázek 2.11: Zpětnovazební obvod Clappova oscilátoru

2.5 Směšování signálů

Oscilátory thereminu, jak už zaznělo v předchozích kapitolách, operují daleko nad slyšitelnými frekvencemi lidského ucha. Pro získání slyšitelného signálu je třeba smísit signály referenčního a variabilního oscilátoru. Směšovače typicky obsahují tři vstupy. Lokální oscilátor (LO), Radio frequency (RF) a Intermediate Frequency (IF) [11][12][13].



Obrázek 2.12: Schéma směšovače

2.5.1 Multiplikativní směšování

Pro V_{IF} platí typicky v případě diodového směšovače vztah

$$V_{IF}(t) = V_{LO}(t) \cdot V_{RF}(t). \quad (2.8)$$

Pro sinusové průběhy vstupních signálů se vztah upraví na tvar

$$V_{IF}(t) = A_{LO} \cdot \sin(\omega_{LO}t + \phi_{LO}) \cdot A_{RF} \cdot \sin(\omega_{RF}t + \phi_{RF}), \quad (2.9)$$

kde A_{LO} a A_{RF} jsou amplitudy vstupních signálů, ω_{LO} a ω_{RF} jsou jejich kmitočty a ϕ_{LO} a ϕ_{RF} jsou jejich fázové posuny.

Z identity pro součin dvou sinů pak vzniká vztah

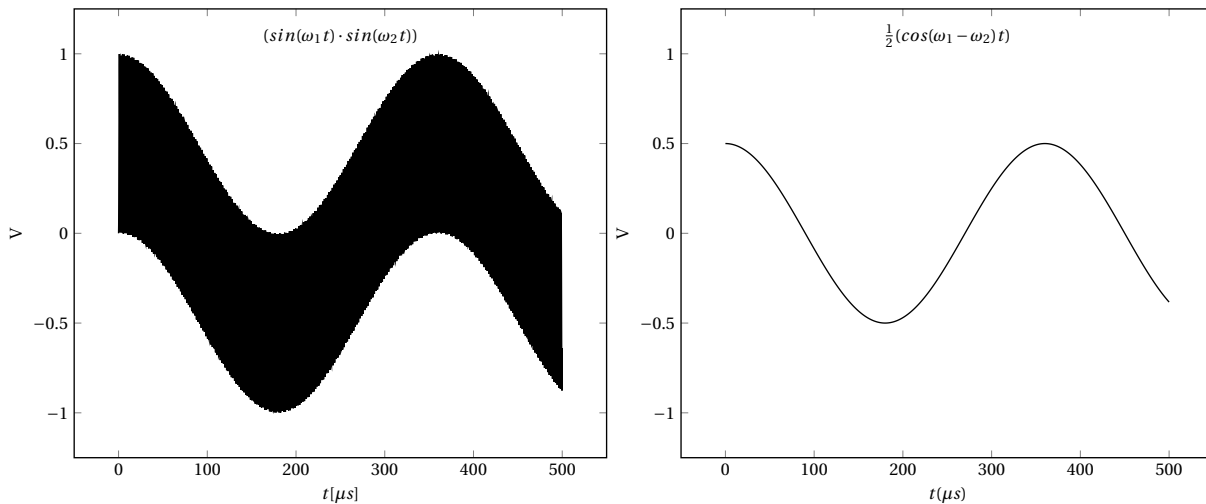
$$V_{IF}(t) = \frac{A_{LO} \cdot A_{RF}}{2} \cdot (\cos((\omega_{LO} - \omega_{RF})t + (\phi_{LO} - \phi_{RF})) - \cos((\omega_{LO} + \omega_{RF})t + (\phi_{LO} + \phi_{RF}))), \quad (2.10)$$

ze kterého při zanedbání fázového posunu vychází vztah pro frekvenci hlavních dvou produktů směšování

$$f_{IF} = f_{RF} \pm f_{LO} \quad (2.11)$$

[11][12][13].

V případě thereminu jsou frekvence f_{RF} a f_{LO} velmi podobné. Při odfiltrování vyšších frekvencí je výstupní signál roven rozdílu signálů vstupních. Na obrázku 2.13 je vidět porovnání původního a odfiltrovaného signálu.



Obrázek 2.13: Výsledek směšování dvou signálů blízkých frekvencí

2.5.2 Aditivní Směšování

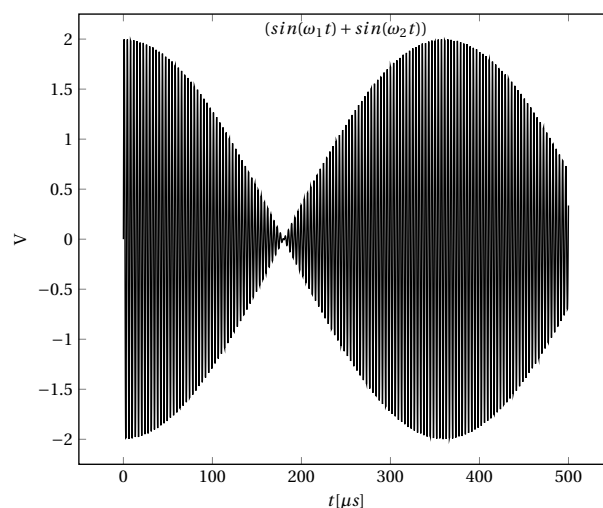
Další alternativou pro získání signálu ve slyšitelném spektru může být i sumace dvou signálů. Součtem dvou signálů vznikne signál, který se nazývá heterodyn. Jeho matematický popis v případě sčítání dvou sinusových signálů vystihuje vztah

$$\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t) = 2\sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right)\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right), \quad (2.12)$$

který se získá dosazením $\alpha = \frac{A+B}{2}$ a $\beta = \frac{A-B}{2}$ do goniometrické identity

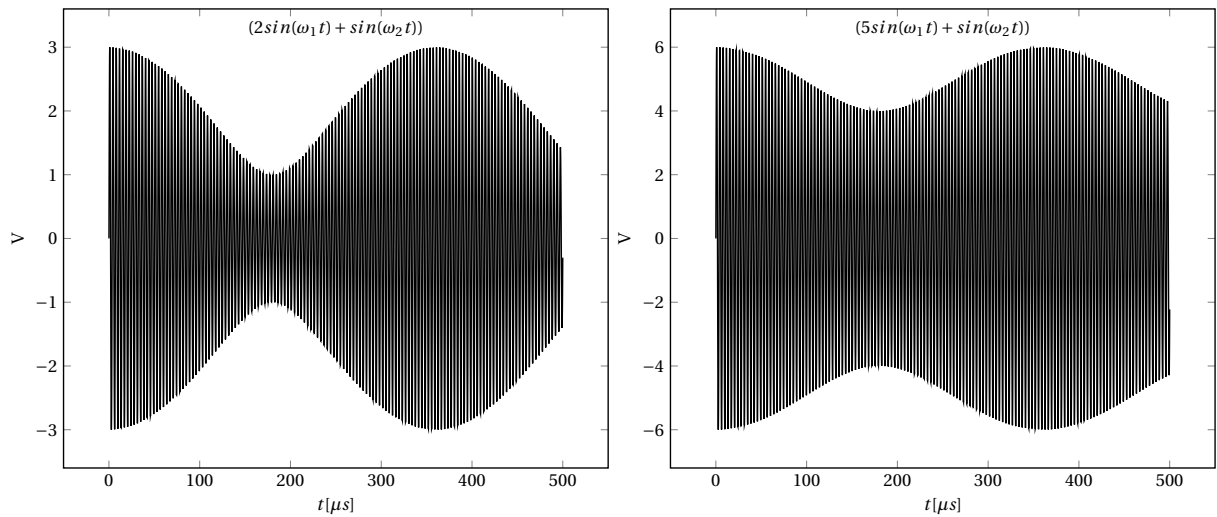
$$\sin((\alpha + \beta)t) + \sin((\alpha - \beta)t) = 2\sin(\alpha t)\cos(\beta t). \quad (2.13)$$

Slovy je možné proces heterodyningu vysvětlit pomocí rozdílů fáze dvou vstupních signálů. Když jsou oba ve stejné fázi, jejich amplituda se sečte, v opačném případě se amplituda odečte. Výsledek součtu dvou signálů stejné amplitudy pak vypadá jako na obrázku 2.14.



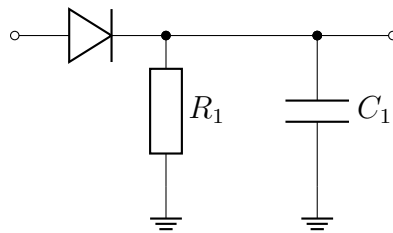
Obrázek 2.14: Suma dvou sinusoidních signálů různých frekvencí

Získáním obálky signálu z obrázku 2.14 vznikne signál s frekvencí rovnou $f_{IF} = f_{RF} - f_{LO}$. Tento signál je však oproti sinusovému průběhu velmi zdeformovaný.



Obrázek 2.15: Suma dvou sinusoidních signálů různých frekvencí a amplitud

Zdeformování signálu je možné částečně odstranit sčítáním dvou signálů různých frekvencí i amplitud. V těchto případech se blíží obálka výstupního signálu ke tvaru sinusového průběhu se stejným směrným odsazením. Nejjednodušším způsobem získání obálky je použití diodového detektoru obálky. Ten ořízne jednu polovinu signálu a zprůměruje tu druhou, tak vznikne signál o požadované frekvenci.



Obrázek 2.16: Detektor obálky

2.6 Standard MIDI

Standard MIDI je nejpoužívanější standard v oblasti přenosu digitálních dat mezi hudebními nástroji. Musical Instrument Digital Interface standard je, jak už název napovídá, standard definující hardwarové i softwarové rozhraní pro komunikaci mezi hudebním nástrojem a dalšími perifériemi.

MIDI, na rozdíl od audio formátů jako je například MP3, nepřenáší přímo zvukový signál, ale pouze informace o zahrané notě. Z tohoto vychází i specialita formátu MIDI, kterou je nezávislost hudebního nástroje (ovladače) a vydaného zvuku.

2.6.1 MIDI spojení

Standard MIDI definuje několik možných způsobů propojení.

Nejvíce používané je spojení pomocí kabelů s pětipinovými DIN konektory. Tento způsob propojení používá UART (Universal asynchronous receiver-transmitter) sběrnici propojenou pomocí stíněné kroucené dvojlinky.

Detaily zapojení vodičů v kabelu a zapojení konektoru se zabývá dokument MIDI 1.0 Electrical Specification [14][15]. Pro přenos midi zpráv se používají pouze tři z pěti pinů konektoru. Pin číslo dva je připojen na zem, pin číslo čtyři je připojen na napájecí napětí a pin číslo pět je připojen na UART vysílač.

MIDI přenos však nemusí být uskutečněn pouze pomocí UART sběrnice, ale může být uskutečněn i pomocí USB, FIREWIRE, nebo ethernet kabelu. Pro bezdrátový přenos může být použita i technologie Bluetooth.

2.7 Zprávy MIDI

Pro přenos informace se v MIDI standardu používají MIDI zprávy. MIDI zprávy se skládají z jednohé až tří osmibitových hodnot.

2.7.1 Status byte

Každá MIDI zpráva začíná statusovým bytem, který určuje typ zprávy a kanál, ke kterému se vztahuje. Nejvyšší bit této zprávy je vždy 1. Zbývajících 7 bitů obsahuje typ zprávy (3 bity) a číslo kanálu (4 bity).

Po statusovém bytu následují jeden nebo dva data byty, které poskytují další informace specifické pro daný typ zprávy. Data byty mají nejvyšší bit vždy 0 [15].

2.7.2 MIDI zprávy

Základními MIDI zprávami jsou Note On a Note Off.

Note On (Status byte 0x90 až 0x9F): Obsahuje dva data byty: číslo noty (0 až 127) a rychlost úderu (velocity, 0 až 127).

Note Off (Status byte 0x80 až 0x8F): Obsahuje dva data byty: číslo noty (0 až 127) a rychlost uvolnění (release velocity, 0 až 127).

Číslo noty v těchto zprávách se určuje podle následující tabulky.

Velocity neboli rychlost značí rychlost úderu, tento parametr je odvozen od klávesových nástrojů a lze si jej představit jako sílu úderu na klávesu. Dalšími MIDI zprávami mohou být i Control Change, umožňující ovládání různých parametrů, jako jsou hlasitost,

oktáva	číslo noty											
	C	#C	D	#D	E	F	#F	G	#G	A	#A	B
-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
2	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
3	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
4	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
5	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
6	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
7	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
8	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119
9	120	121	122	123	124	125	126	127				

Tabulka 2.2: Reprezentace not ve formátu MIDI [16]

panoráma, modulace atd., Program Change, který mění program nebo zvukovou banku nástroje, nebo Pitch Bend, umožňující jemné ladění výšky tónu [15].

Kapitola 3

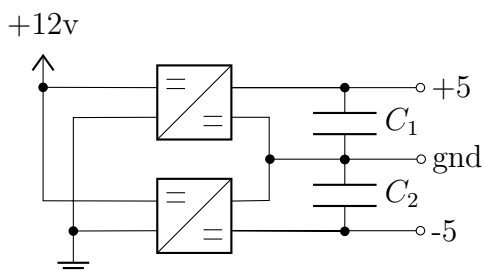
Návrh modulárního thereminu

V raných fázích návrhu thereminu jsem se zamýšlel nad nejvyšší praktickou úrovní modularity. Cílem bylo dodržení rozumné velikosti modulů tj., aby nebyly moduly příliš malé a šlo s nimi prakticky zacházet. Vytvořil jsem pět základních modulů, které je možné navzájem kombinovat (Více v sekci 3.7). Obsahy jednotlivých modulů jsem určil dle vlastního uvážení tak, aby umožňovaly co nejvíce kombinací, ale aby byly zároveň alespoň přibližně stejně velké. Celkem jsem vytvořil pět různých modulů: napájecí, tónový, hlasitostní zesilovací a μC .

3.1 Napájecí modul

Při přípravě modulárního systému mi bylo jasné, že nechci vytvářet samostatné napájení pro každý z modulů. Jasnou odpovědí na otázku: "Jak napájet theremin?", bylo vytvoření samostatného napájecího modulu. Pro napájení celého thereminu jsem se rozhodl využít napájení ± 5 V. Tuto hodnotu jsem si vybral jelikož je $+5$ V častou hodnotou napájecího napětí mikrokontrolérů a zároveň je ± 5 V dostačující napájecí napětí pro velké množství operačních a transkonduktančních zesilovačů, které jsem se rozhodl použít ve směšovacím modulu.

Pro zjednodušení celého návrhu jsem se rozhodl použít sériového zapojení step-down DC/DC měničů z 12 na 5 V tak, aby bylo možné do thereminu zapojit jakýkoliv 12V DC zdroj pomocí dc barel jacku, bez nutnosti integrace samotného zdroje do thereminu. Pro zvýšení stability napájecího napětí jsem přidal paralelně k výstupům z měničů velké elektrolytické kondenzátory C_1 a C_2 . Takovéto zapojení je vhodné pro jakékoli měniče.



Obrázek 3.1: Schéma napájecího modulu

Na výstupu má plovoucí neuzeměnou nulu a 5 V. V případě použití izolovaných měničů je možnost připojení plovoucí nuly na zem a přivedení pevné země do celého thereminu.

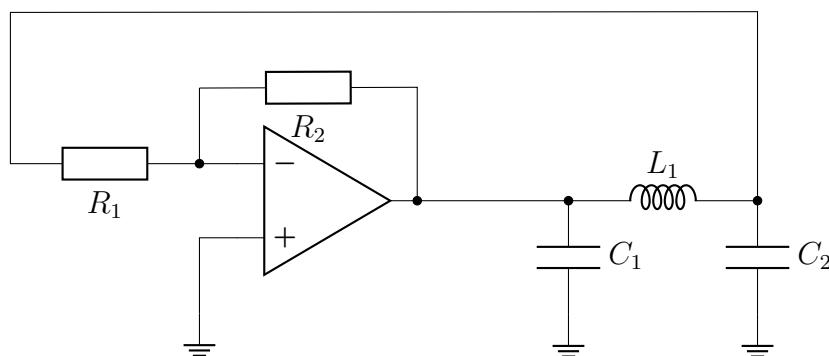
Vzhledem k plovoucí zemi některých zdrojů je vhodné přidat i přímé propojení se zemnicím kolíkem v zásuvce.

3.2 Tónový modul

Jako svůj cíl při návrhu tónového modulu jsem si stanovil modul, který bude generovat signál v slyšitelném spektru, tedy aby se jednalo o tónový obvod z kapitoly 2.2. Mojí představou byl univerzální modul, jehož vnitřní elektronika by se nemusela měnit při používání různých druhů antén a stačilo by tedy jen vyměnit anténu. Ovládání jsem omezil pouze na jeden potenciometr ovládající frekvenci referenčního oscilátoru. Pro složení z variabilního oscilátoru, referenčního oscilátoru a směšovacího obvodu jsem se rozhodl, kvůli snaze eliminovat rušení signálů v případě, že by byly oscilátory oddělené a signál by vedl vždy samostatným vodičem.

3.2.1 Oscilátory

V typickém thereminu se nacházejí celkem tři oscilátory, přestože má každý z nich trochu jinou roli, může být jejich základní konstrukce v podstatě totožná. Při návrhu variabilního oscilátoru pro použití v thereminu jsem přihlížel na fakt, že anténa je v podstatě kondenzátorem mezi bodem v obvodu a zemí. Z tohoto důvodu jsem vybral Colpittsův oscilátor, který je zároveň dostatečně nestabilní, aby ho bylo možné jednoduše řídit změnou kapacity. Další výhodou Colpittsova oscilátoru je i jeho jednoduchost a prostorová nenáročnost. Pro další zjednodušení a zmenšení lze použít zapojení Colpittsova oscilátoru s invertujícím operačním zesilovačem a rezonančním členem ve zpětné vazbě. Za cílem zjednodušení návrhu jsem se rozhodl vytvořit všechny oscilátory pomocí stejného typu oscilátoru.



Obrázek 3.2: Colpittsův oscilátor s operačním zesilovačem

Prvním krokem při návrhu oscilátorů je určení frekvence. Prvním faktorem při výběru frekvence je nízká kapacita antén, která by byla v případě oscilátorů pro nízké frekvence o mnoho řádů nižší, než jakýkoliv další kondenzátor v obvodu, měla by tedy zanedbatelný vliv na frekvenci oscilací.

Z druhé strany je limitující nabídka operačních zesilovačů, protože většina běžně dostupných operačních zesilovačů nemá příliš vysoký slew rate a velikost pracovního pásma. Ideální je tedy frekvenční rozmezí stovek kHz.

Aby byla frekvence oscilátorů dostatečně vysoká a rozdíl frekvencí mezi tónovými a hlasitostním oscilátorem dostatečný, rozhodl jsem se pro přibližné hodnoty frekvencí přibližně 800 kHz pro tónový a 600 kHz pro hlasitostní oscilátor.

Limitujícím faktorem při návrhu oscilátorů byla dostupnost variabilních cívek, pomocí kterých provádím hrubé ladění oscilátorů. Zvažoval jsem i ladění pomocí variabilních kondenzátorů, ale od těch jsem upustil z důvodu nedostupnosti variabilních kondenzátorů s dostatečně širokým rozsahem kapacit. Výsledkem mého hledání byly variabilní cívky s rozsahem 45 až 100 μH .

Pro danou frekvenci a indukčnost lze ze vztahu pro kmitočet Colpittsova oscilátoru jednoduchou úpravou získat požadovaná hodnota celkové kapacity.

$$C_{\text{celk}} = \frac{1}{4\pi^2 f_{\text{rez}}^2 L} \quad (3.1)$$

Při dosazení $L = 75 \mu\text{H}$ a $f_{\text{rez}} = 900 \text{ kHz}$ vychází celková kapacita přibližně 410 pF.

Pro splnění Nyquistova kritéria stability $A(j\omega)\beta(j\omega) > 1$ jsem se rozhodl vybrat

$A = -100$ a $\beta = -1/10$.

Beta se rovná přenosové funkci $H(j\omega)$ zpětnovazební části obvodu.

$$H(j\omega) = \frac{u_{\text{out}}}{u_{\text{in}}} = -\frac{C_2}{C_1} \quad (3.2)$$

Pro poměr kapacit 1:10 je tedy potřeba zesílení alespoň

$$|A| > \frac{C_1}{C_2} = 10. \quad (3.3)$$

Zesílení na invertujícím zesilovači se nastaví pomocí $R_1 = 1\text{k}\Omega$ a $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$. Hodnoty samotných kondenzátorů dostaneme ze vzorce 2.6 dosazením podmínky $C_1 = 10 \cdot C_2$.

$$C_{\text{celk}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{10 \cdot C_2^2}{11 \cdot C_2}$$

Jejich hodnoty pak jsou: $C_2 = 1.1 \cdot C_{\text{celk}}$ a $C_1 = 11 \cdot C_{\text{celk}}$, tedy 450 pF a 4,5 nF tyto hodnoty jsou nejbližšími standardními hodnotami $C_2 = 470\text{pF}$ a $C_1 = 4,7 \text{ nF}$.

Získal jsem tedy všechny hodnoty elektrických prvků potřebných pro vytvoření společné části proměnného i referenčního oscilátoru. To, v čem se tyto dva oscilátory liší, je anténní či ladicí obvod.

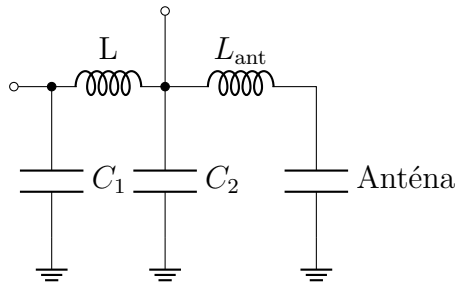
Anténní obvod

V tónové části thereminu musí anténa přímo měnit frekvenci oscilací variabilního oscilátoru. Aby tomu tak bylo, je nutné připojit anténu tak, aby její kapacita byla paralelně k jednomu z kondenzátorů ve zpětnovazebním obvodu Colpittsova oscilátoru z kapitoly 3.2.1. Ze vztahu pro paralelní kombinaci kondenzátorů 2.6 je zřejmé, že při přičtení kapacity k menšímu z kondenzátorů je změna kapacity větší, než při přičtení kapacity antény ke kondenzátoru většímu. Z tohoto důvodu bude i změna frekvence vyšší a nástroj bude mít lepší odezvu.

Takto doplněný oscilátor bude měnit svoji frekvenci v závislosti na kapacitě vůči ruce hráče. Nicméně jak bylo řečeno v kapitole 2.3, je nutné, z důvodu potlačení rušení a zvýšení citlivosti, přidat sériově k anténě i cívku.

Robert Moog udává, že se kapacita antén vůči zemi pohybuje mezi 10 až 15 pF [6]. Toto číslo se mi později při vlastních pokusech povedlo potvrdit. Ze známého kmitočtu a kapacity je možné jednoduše stanovit hodnotu cívky dosazením do vzorce

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_{\text{rez}}^2 C}.$$

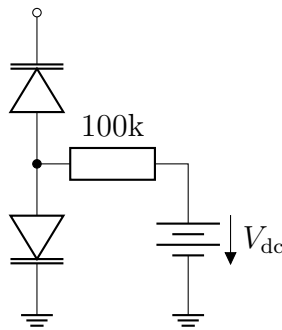


Obrázek 3.3: Zpětnovazební obvod Colpittsova oscilátoru s anténou

Ladicí obvod referenčního oscilátoru

Ladicí obvod je velmi důležitá součást thereminu. Bez ladicího obvodu by byla frekvence variabilního a referenčního oscilátoru velmi rozdílná. Aby tomu tak nebylo a bylo možné theremin ladit, je nutné přidat k referenčnímu oscilátoru na místo antény ladicí obvod, který se z pohledu obvodu bude chovat jako anténa tj. bude vykazovat kapacitu vůči zemi.

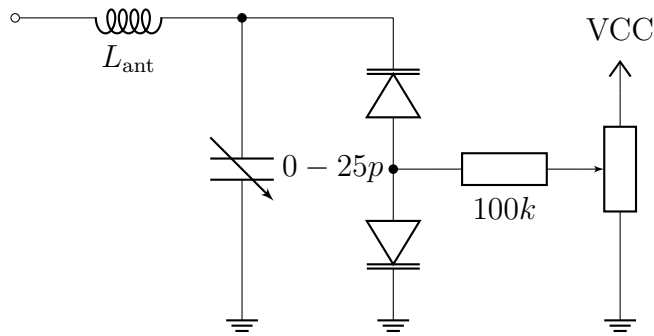
Takovýto prvek by mohl teoreticky být pouze klasickým kondenzátorem sériově s cívkou jako u antény. Je však žádoucí, aby byla kapacita proměnná a mohla kompenzovat různá prostředí ve kterých by byl theremin provozován. Proměnné kondenzátory v řádech nižších desítek pF se běžně vyrábějí, ale mají formu trimmeru, který není pro běžné používání příliš přívětivý a byl by složitě přístupný. Vhodnějším řešením je použití kapacitních diod neboli varikapů.



Obrázek 3.4: Typické zapojení varikapů v antisériovém zapojení [11]

Na obrázku 3.4 je vidět zapojení varikapů vhodné pro použití v thereminu. Oba varikapy mají na katodě nulové stejnosměrné napětí, lze je tedy jednoduše ovládat stejnosměrným napětím V_{dc} . Pro harmonické složky se pak diody navzájem kompenzují zvýšením kapacity na jedné diodě při poklesu napětí na druhé.

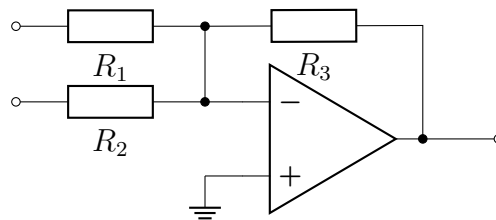
Napětí V_{dc} lze jednoduše ovládat pomocí potenciometru, který je podstatně uživatelsky přívětivější než trimmer a umožňuje potenciální zvýšení celkové kapacity paralelním zapojením více varikapů. Ve svém návrhu jsem se rozhodl použít jak varikapy, tak kapacitní trimmer. Ten je pro jednorázové nastavení přibližné kapacity při výrobě thereminu. Varikapy jsou pak určeny na ladění při běžném provozu.



Obrázek 3.5: Celkový návrh ladicího obvodu

3.2.2 Směšovací obvod

Pro získání signálu ve slyšitelném spektru jsem se rozhodl využít metody součtu signálů a následného detekce obálky. Důvodem byla především nižší cena provedení a jednoduchost zapojení. Pro sčítání signálů jsem použil sumátor s operačním zesilovačem [10].



Obrázek 3.6: Sumátor signálů

Pro takovéto zapojení platí vztah pro proud rezistorem R_3

$$I_{R_3}(t) = -\frac{U_1(t)}{R_1(t)} - \frac{U_1(t)}{R_2(t)}$$

a výstupní napětí se řídí rovností

$$U_{out} = -R_3 \left(\frac{U_1(t)}{R_1(t)} - \frac{U_1(t)}{R_2(t)} \right).$$

U typického zapojení sumátoru jsou všechny hodnoty rezistorů stejné. Výstupní signál sumátoru je pak signál

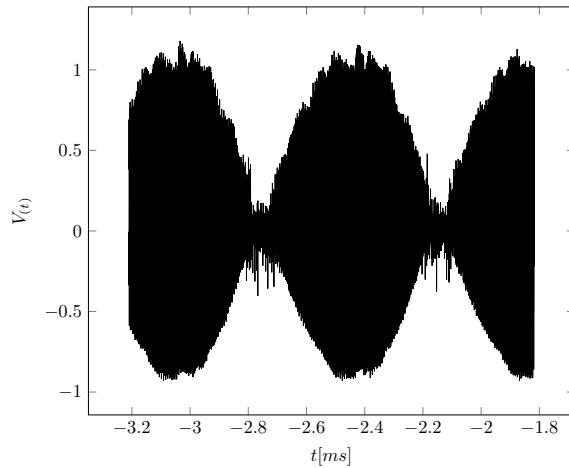
$$s(t) = \sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t),$$

který může vypadat například jako signál na obrázku 3.7.

Hodnoty rezistorů je však možné upravovat. Jestliže nebudou hodnoty rezistorů stejné, změní se i rovnice pro výstupní signál. Nová rovnice bude ve tvaru

$$s(t) = B(A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t)),$$

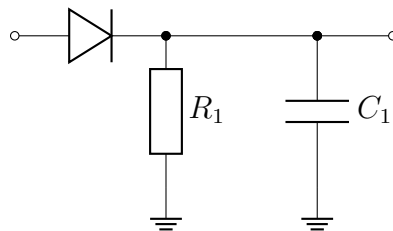
kde B udává celkové zesílení součtu signálů toto zesílení lze měnit pomocí rezistoru R_3 na obrázku 3.7. A_1 a A_2 pak udávají vzájemný poměr amplitud vstupních signálů neboli hloubku modulace, kterou lze měnit změnou hodnot rezistorů R_1 a R_2 . V takovémto případě bude mít obálka součtu signálů průběh podobnější sinu, ale její amplituda bude po odfiltrování stejnosměrné složky signálu menší.



Obrázek 3.7: Graf součtu dvou sinusových signálů

Detekce obálky

Dalším krokem je detekce obálky. Detektor obálky jsem se rozhodl implementovat pomocí diody, která odfiltruje záporné části signálu a umožní vyprůměrování signálu pomocí paralelního RC článku. V případě, že je časová konstanta $\tau = RC$ příliš velká je signál zploštěný a zahlazuje se na klesající straně vlny. Naopak, když je τ příliš nízké signál je zašumělý a podobá se příliš původnímu signálu.

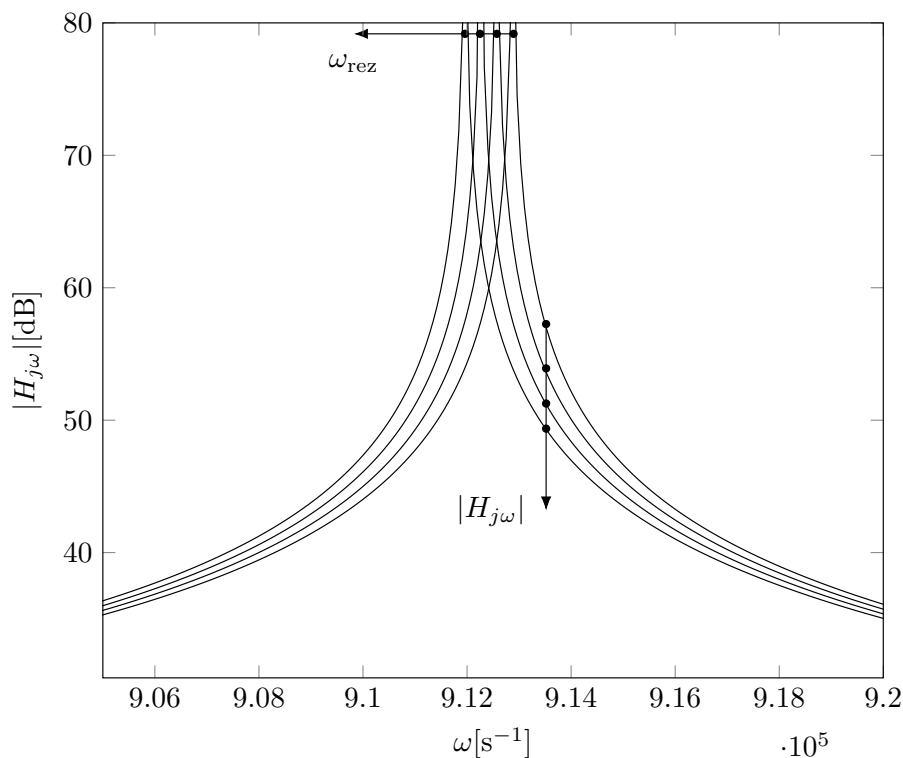


Samotné hodnoty R a C jsem našel experimentálně v simulačním softwaru a doladil při sestavování thereminu. Výsledkem byly hodnoty 10 nF a $10 \text{ k}\Omega$. Nakonec jsem pro odizolování obvodu od výstupu přidal na výstup detektoru obálky operační zesilovač zapojený jako napěťový sledovač. Ten zamezí vlivům prvků, mimo tónový modul, na sledovač obálky. Výstup sledovače je pak přiveden na výstup celého bloku.

3.3 Hlasitostní modul

Úlohou tohoto modulu je generovat stejnosměrné řídicí napětí, kterým pak bude ovládáno zesílení ve směšovacím modulu, nebo bude moci být připojen na vstup μC pro řízení libovolné veličiny.

Základem hlasitostního obvodu je totožný oscilátor jako v tónovém modulu. Jediný rozdíl je, že na sebe nemá připojenou anténu a generuje tedy stabilní frekvenci, nastavenou jednorázově pomocí variabilní cívky. Signál z oscilátoru je přiveden na vstup LC rezonátoru, tvořeného cívkami a kapacitou antény. Tento rezonátor má přenosovou funkci podobnou té na obrázku 2.8. Cílem je, aby byla klidová rezonanční frekvence rezonátoru jen o trochu nižší, než frekvence signálu z oscilátoru. Jelikož je na rezonanční frekvenci vrchol přenosové funkce, bude mít signál v rezonátoru blízko u budící frekvence největší amplitudu. V případě přiblížení ruky k anténě se posune vrchol dál od budící frekvence a amplituda se zmenší.



Obrázek 3.8: ilustrace změny amplitudy kmitání LC rezonátoru při změně kapacity

Pro zamezení vlivu okolního šumu jsem se rozhodl rozdělit indukčnost do tří sériově zapojených cívek a sledovat napětí ne mezi L a C, ale mezi dvěma z cívek.

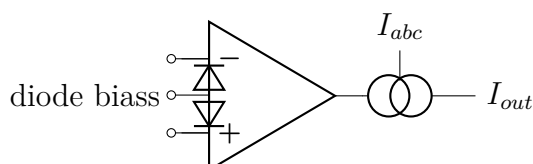
Signál v tomto bodě mění svoji amplitudu v závislosti na vzdálenosti ruky od antény. Stačí tedy získat obálku takového signálu a vznikne stejnosměrný signál. Detektor obálky jsem použil stejný jako v tónovém modulu. Pro odizolování sledovače od rezonančního obvodu a výstupu z modulu jsem podobně jako u tónového modulu přidal před a za rezonátor sledovač. Nakonec jsem přidal pouze potenciometr, který tvoří napěťový dělič pro výstupní napětí.

3.4 Směšovací modul

Z předchozích bloků vychází signál ve slyšitelném spektru a řídicí napětí. Úkolem tohoto bloku je předzesilovat slyšitelný signál a měnit jeho amplitudu v závislosti na řídicím napětí. Jinými slovy vytvořit součin těchto dvou signálů.

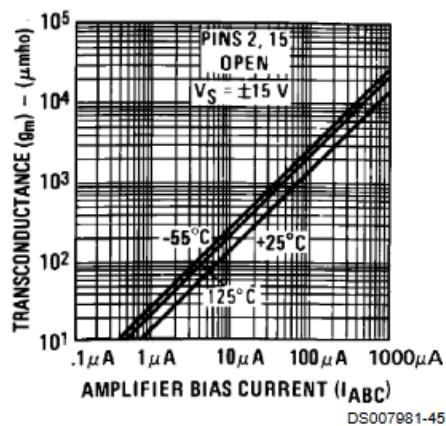
Vhodným kandidátem pro tyto účely je zesilovač s proměnným zesílením (VGA - variable gain amplifier). Tyto zesilovače jsou běžně dostupné, poměrně levné a typicky integrované v poměrně malých pouzdrech. Mimo integrovaných a tranzistorových zapojení existuje zapojení s transkonduktančními zesilovači (OTA - operational transconductance amplifier). Toto zapojení používá Robert Moog ve svém Moog Etherwave Thereminu [6].

Moogův návrh má navíc několik zajímavých vlastností oproti typickým VGA, díky použití OTA může upravovat mimo hlasitosti i tvar výstupní vlny. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl inspirovat Moogovým návrhem a použít novější verzi, jím použitého OTA LM13600 zesilovač LM13700. LM13700 obsahuje dva OTA s bias diodami a dva darlingtonovy páry. [17]



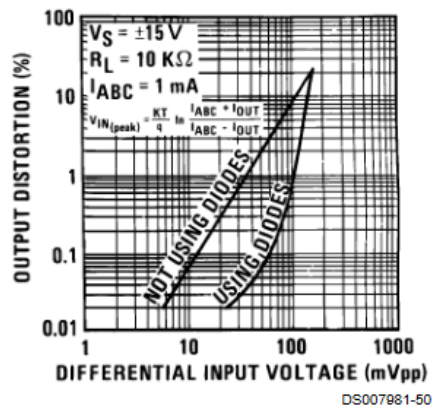
Obrázek 3.9: Transkonduktanční zesilovač s bias diodami

Transconductance



Obrázek 3.10: závislost transkonduktance na I_{abc} [17]

Distortion vs Differential Input Voltage



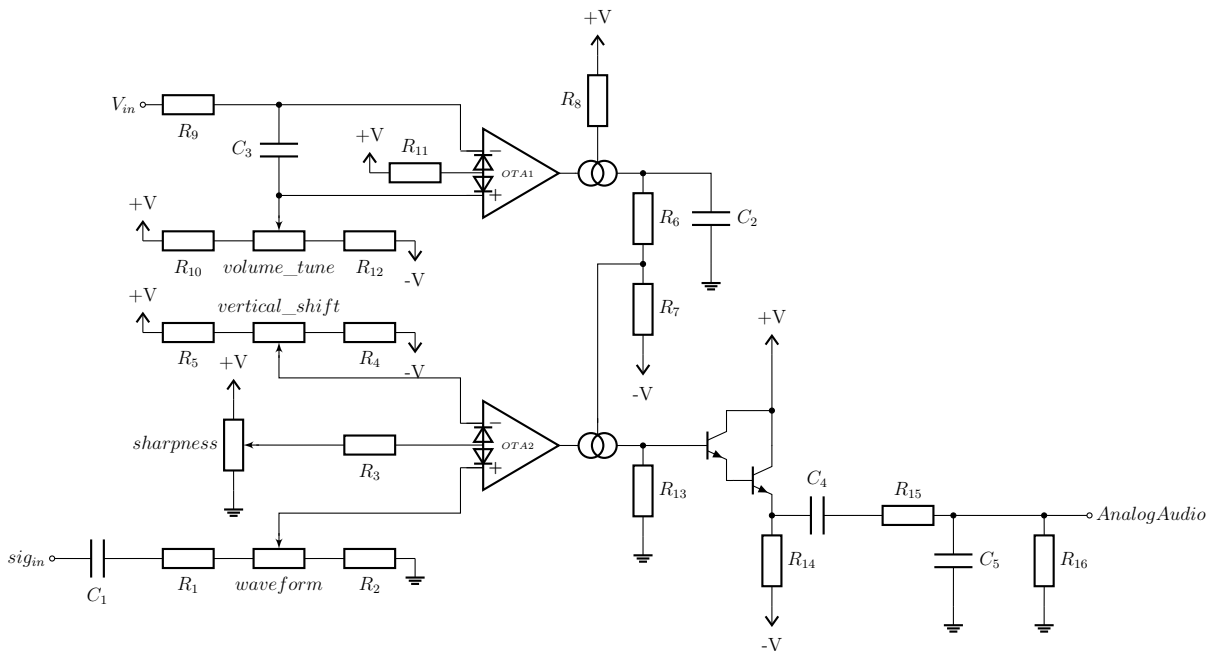
Obrázek 3.11: Závislost diferenčního napětí na zkreslení [17]

Transkonduktanční zesilovače, na rozdíl od typických zesilovačů nejsou zdroje napětí řízené napětím, ale proudové zdroje řízené napětím. Výstupní proud transkonduktančního zesilovače je

$$I_{out} = g_m U_d,$$

kde g_m vyčteme z grafu 3.10 a U_d je diferenční napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem. Kvůli vysoké hodnotě g_m stačí, aby bylo diferenční napětí poměrně malé, řádově desítky mV. V případě zvyšování diferenčního napětí začne být signál zkreslený. tento efekt je vidět na grafu na obrázku 3.10.

Ve směřovací modulu používám oba transkonduktanční zesilovače z LM13700. První (*OTA1*) používám jako zesilovač stejnosměrného řídicího napětí, tedy zdroj proudu I_{abc} pro druhý transkonduktanční zesilovač (*OTA2*), který pak zesiluje samostatný signál.



Obrázek 3.12: Schéma směšovacího modulu

Na signálovém vstupu bloku sig_{in} je kondenzátor pro oddělení stejnosměrné složky signálu a napěťový dělič s potenciometrem *waveform*. Tím se upravuje amplituda vstupního signálu. Vzhledem k velkému zesílení začne signál brzo narážet na omezení a vzniká zploštělý signál. Krajiní hodnotou je pak signál obdélkový. Na invertující vstup je připojen napěťový dělič s potenciometrem *vertical_shift*, který zvětšuje diferenční napětí a zvyšuje zkreslení viz obrázek 3.11. DC offset signálu pak odfiltruje kondenzátor C_4 . Potenciometr *sharpness* upravuje napětí na linearizačních diodách. Při přivedení napětí na diody se mění zkreslení výstupního signálu viz obrázek 3.11.

Napěťový vstup V_{in} je připojen přes R_9 na invertující vstup. Invertující a neinvertující vstup *OTA1* jsou propojeny pomocí C_3 . C_3 tvoří vysokofrekvenční zkrat mezi inv. a neinv. vstupem, který pomáhá odizolovat šum a zamezuje jeho šíření a ovlivňování výstupního signálu.

R_{10} , R_{12} a potenciometr *volume* tvoří napěťový dělič, který určuje referenční napětí na neinvertujícím vstupu *OTA1*.

Rezistor R_8 omezuje zesílení *OTA1*. Rezistory R_6 a R_7 tvoří napěťový dělič, kterým se určuje proud I_{abc} do *OTA2*. Ten upravuje celkové zesílení signálu. Z důvodu nestability parametrů zatíženého napěťového děliče jsem hodnoty R_6 a R_7 určil experimentálně pomocí simulace. Hodnotou R_{13} je nastavena amplituda výstupního napětí zesilovače tvořeného darlingtonovým párem a rezistorem R_{14} .

Na výstupu celého bloku je RC filtr typu pásmová propust jehož výstup je připojen na *AnalogAudio*.

Maximální napětí na výstupu celého bloku odpovídá maximu pro linkovou úroveň 850 mVpp.

3.5 μ C modul

Již od začátku návrhu modulárního thereminu jsem věděl, že chci do svého návrhu přidat i mikrokontroler pro zpracování zvukového signálu a pro možnou digitalizaci výstupů z thereminu.

Vzhledem k předchozí zkušenosti s programovacím jazykem C++ jsem se rozhodl pro použití mikrokontroleru Raspberry Pi Pico W.[18]

Tento mikrokontroler obsahuje mimo jiné dvoujádrový procesor Arm Cortex M0+ který umožňuje i přetaktování, 264 kB SRAM a 2 MB flash paměti [18]. Výhodou je také možnost programovacího prostředí Arduino IDE, které má širokou uživatelskou podporu.

Jelikož nemá Raspberry Pi Pico přímou podporu prostředí Arduino IDE, bylo nutné použít knihovnu Arduino Pico [19].

Arduino Pico navíc implementuje ovládání wifi, přetaktování procesoru až na 270 MHz, umožňuje používání některých embedded funkcí procesoru a omezené ovládání obou jader Pica, které v Arduino IDE chybí.

3.5.1 Načítání dat

Pro vzorkování v reálném čase bylo nutné vybrat správnou vzorkovací frekvenci. Frekvence nejvyšší MIDI noty s číslem 127 je 12543,85 H. Vzhledem k frekvenci nejvyšší noty jsem nastavil maximální frekvenci na 15 kHz. Pro odstup 2,5 kHz jsem se rozhodl, abych zamezil aliasingu s vyššími harmonickými složkami signálu. Ze vzorkovacího teorému

$$f_{smp} = 2 * f_{max} \quad (3.4)$$

vychází vzorkovací frekvence 30 kHz. Vyšší frekvenci jsem nechtěl použít jelikož by snížila přesnost viz FFT 3.5.3.

Pro nastavení ADC (analogově-digitálního převodníku) jsem použil embedded funkce Raspberry PI.

```
adc_gpio_init(26 + CAPTURE_CHANNEL);
adc_init();
adc_select_input(CAPTURE_CHANNEL);
adc_fifo_setup(true, false, 0, false, false);
adc_set_clkdiv(CLOCKDIVIDER);
```

Při zavolání funkce

```
adc_run(true);
```

se spustí ADC ve free running módu a měří na frekvenci 30 kHz. ADC ukládá data do fifo bufferu ze kterého ho pak procesor vyjme a přidá ho do pole dat.

Při načtení 2048 vzorků je načítání ukončeno a na pole je aplikována rychlá fourierova transformace. Celkové načtení dat is s fourierovou transformací pak trvá přibližně 84 ms.

3.5.2 FFT a zpracování signálu

Pro vypočítání FFT jsem použil Adafruit Zero FFT Library [20], která je vysoce optimalizovaná pro procesory ARM-Cortex M0+. FFT s 4096 hodnotami vypočítá na přetaktovaném Piku přibližně za deset milisekund.

Adafruit ZeroFFT je "run in place", to znamená že svůj výsledek uloží zpátky do původního pole.

Na toto pole je pak aplikován jednoduchý algoritmus na hledání vrcholu funkce.

```

float find_max(){
    int max_val=FFT_FLOOR;
    int max_index=0;
    for(int i=0;i<LOW_BINS;i++){
        read_buffer[i]=3;
    }
    for(int i=LOW_BINS;i<NFFT/2;i++){
        if(read_buffer[i]>max_val){
            max_val=read_buffer[i];
            max_index=i;
        }
    }
    if(max_index>LOW_BINS && max_val>FFT_FLOOR){
        return max_index;
    }
    return 0;
}

```

LOW_BINS značí počet prvních hodnot FFT, které nemají být považovány za důležité. Slouží k zanedbání stejnosměrné složky signálu a FFT_FLOOR značí hodnotu spektra, která je počítána jako šum. V případě, že by algoritmus při hledání vrcholu našel vrchol, který by byl menší či roven této hodnotě zahodí ho.

Výstupem této funkce je pak bod FFT s nejvyšší hodnotou,

3.5.3 Získání frekvence

Pro získání dominantní frekvence signálu z pozice vrcholu FFT, je nutné spočítat frekvenční krok mezi jednotlivými body FFT. Ze známé vzorkovací frekvence a známého počtu prvků FFT můžeme spočítat celkový frekvenční rozsah FFT.

$$f_s = \frac{1}{t_s} = \frac{N}{Nt_s} \quad (3.5)$$

$$f_{max} = \frac{f_s}{2} = \frac{N}{2Nt_s} \quad (3.6)$$

Frekvenční krok se pak vypočítá vydělením celkového frekvenčního rozsahu počtem prvků FFT.

$$\Delta f = \frac{f_{max}}{N} = \frac{1}{2Nt_s} = \frac{f_s}{2N} \quad (3.7)$$

Frekvence k-tého bodu FFT se pak spočítá jako

$$k\Delta f = \frac{kf_s}{2N}. \quad (3.8)$$

Tato frekvence je pak převedena na číslo midi noty. Převod je uskutečněn pomocí pole note_freq obsahujícího centrální frekvenci jednotlivých not.

```

int freq_to_midi(){
    int midi=0;
    if(FREQ>100 && FREQ<12000){
        for(int i=0;i<82;i++){

```

```

        if(note_freq[i]<FREQ&&FREQ<note_freq[i+1]){
            if(FREQ-note_freq[i]>note_freq[i+1]-FREQ){
                midi= i+43;
            }
            else{
                midi= (i+44);
            }
            break;
        }
    }
}
else{
    midi= -1;
}
return midi;
}

```

Získaná nota pak může být poslána pomocí Uart na MIDI konektor pomocí funkce send_MIDI, kde napětí z hlasitostního modulu je reprezentováno parametrem velocity.

```

void send_MIDI(byte noteOnStatus, byte noteNumber, byte velocity) {
    Serial1.write(noteOnStatus);
    Serial1.write(noteNumber);
    if ((noteOnStatus & 0xF0) != 0xC0 && (noteOnStatus & 0xF0) != 0xD0) {
        Serial1.write(velocity);
    }
}

```

3.5.4 Lokální webový server

Pro komunikaci thereminu s okolím jsem se rozhodl využít i wifi schopností RPI Pica.

Jelikož RPI Pico W obsahuje wifi modul, může se připojit k wifi síti. Na tomto základu jsem postavil webový server, který umožňuje vysílání aktuálně hrané noty a spektra hraného tónu. v Arduino IDE mohou být Pico nastaveny přihlašovací údaje na lokální wifi síť.

```
// Set up WiFi credentials
const char* ssid = "wifiname";
const char* password = "wifipassword";
```

Ty jsou pak použity k připojení k wifi. Po připojení k wifi vytvoří Pico lokální server s nastavenými post a get cestami. Inicializace serveru je provedena v setup funkci.

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(1000);

  // Connect to WiFi
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(1000);
    Serial.println("Connecting to WiFi...");
  }

  Serial.println("Connected to WiFi");
  Serial.print("IP Address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  // Set up routes
  server.on("/select", handlePost);
  server.on("/note", handleOutcome1);
  server.on("/spectrum", handleOutcome2);

  // Start server
  server.begin();
  Serial.println("HTTP server started");
}
```

Setup funkce zároveň vypíše lokální adresu webového serveru. Tento webový server definuje tři funkce, první je select HTTP metody post. Select vybírá zda Pico připraví data pro vyslání čistě midi noty nebo i celého spektra. Note a spectrum jsou cesty HTTP metody get. Těmito cestami si webová stránka požádá o data od Pica. Při zavolání jedné z výše zmíněných cest je zavolán daný handler, který provede potřebné operace. Pro rychlé posílání dat webové stránce jsem pro přenos využil CSV (čárkami oddělá data) ve formátu string. Tento způsob přenosu umožňuje rychlý přenos dat a vykreslení až pomocí skriptu přímo ve webové stránce.

3.5.5 Webová stránka

Pro zobrazování dat z RPI Pica jsem vytvořil jednoduchou webovou stránku. Tato webová stránka používá Python frameworku Flask. Webová stránka obsahuje tři stránky.

První slouží k vyplnění lokální ip adresy Pica. Aby webová stránka fungovala, musí být pico i zařízení připojeno na stejné lokální síti.

Druhá webová stránka vypisuje aktuálně hranou notu a mění barvu pozadí v závislosti na hrané notě. Hodnota noty a barva stránky se obnovují každých 200 ms.

Třetí stránka vykresluje graf spektra. Tento graf je obnovován dvakrát za vteřinu. V případě vykreslování grafu je zapnuto předávání informací mezi jádry. Při otevření této webové stránky může být negativně ovlivněna rychlost odezvy na midi výstupu, jelikož Pico musí připravit všechna data na přenesení.

3.5.6 Dvoujádrový běh

Jelikož musí Pico vykonávat načítání dat, FFT, vysílání MIDI zpráv i hostování webového serveru, rozhodl jsem se pro využití obou jader procesoru.

Jádro číslo 0 je určené především pro komunikaci. Obsluhuje webový server a vypisuje data na MIDI UART. Jádro 1 obsluhuje načítání dat, FFT a hledání hraného tónu. Kvůli použití programovacího prostředí Arduino IDE a knihovny Arduino Pico, se po kompilaci chová paměť Pica jako dvě odělené paměti, tedy není možné, aby obě jádra přistupovala ke stejným proměnným. Komunikace je tedy mezi jádry prováděná pomocí FIFO zásobníku definovaného knihovnou Arduino Pico.

Na konci běhu svého cyklu pošle jádro 1 do zásobníku frekvenci. Posláním hodnoty přeruší běh jádra 0, které tuto hodnotu zpracuje a provede s ní všechny potřebné úkony. V případě, že je otevřená webová stránka na vykreslování grafu předá jádro 1 jádru 0 celé pole s výsledkem FFT. To může způsobit zpomalení běhu Pica.

3.6 Zapouzdření thereminu

Pro vytvoření modulárního systému bylo potřeba vytvořit způsob, jakým budou jednotlivé moduly pospojované, tak aby fungovaly a byly i dostatečně bytelné a vydržely hrubější manipulaci.

V raných fázích vývoje jsem přemýšlel nad systémem horizontálního skládání jednotlivých modulů. Ty by se propojovaly pomocí zdířek a kabelů na zadních stranách.

S tímto způsobem jsem však nebyl spokojen, hlavně z důvodu složitosti a předpokládané zdlouhavosti přípravy na hru.

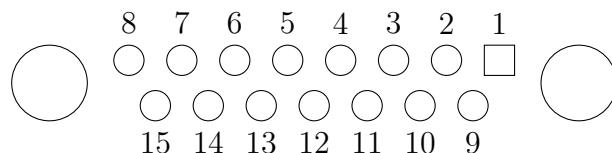
Abych zjednodušil zapojení, rozhodl jsem se použít univerzální kabely, které by spojovaly všechny moduly do série. Každým modulem tedy prochází všechny spojovací vodiče a každý modul je připojen jen na ty, které potřebuje.

Tento návrh jsem nakonec ještě upravil, jelikož jsem při hledání vhodného konektoru pro propojení modulů objevil možnost použití D-SUB konektorů. Ty mají široké rozmezí počtu vodičů jsou bytelné a vyrábí jak samčí tak samičí provedení do panelu. Použití D-SUB konektorů mi umožnilo připojení jednotlivých modulů přímo do sebe, bez použití spojovacích kabelů.

Finální verze modulárního systému krabiček je vertikální "věž", kde se jednotlivé moduly skládají na sebe. Pro vertikální skládání jsem se nakonec rozhodl z důvodu jednodušší konstrukce krabiček a lepší možnosti přizpůsobení rozložení modulů thereminu.

Díky natažení všech důležitých vodičů skrz celý theremin, nezávisí na pořadí jednotlivých modulů. Zároveň to umožňuje připojení testovacího PCB na poslední modul a připojení dalších zařízení na theremin, bez nutných úprav samotných modulů thereminu.

Z nabídky D-SUB konektorů jsem se rozhodl pro dvouřadé patnácti pinové. Na horní straně modulu je samičí na spodní straně modulu samčí. Na obrázku 3.13 je znázorněno rozložení jednotlivých pinů v konektoru při pohledu shora dolů.



Obrázek 3.13: Rozložení vodičů v konektoru

Piny 1, 2 a 3 jsou určeny pro napájení thereminu. Na 4. pinu je výstup z tónového modulu nazvaný `analog_audio_1` a na pátém pinu je `analog_audio_2` sloužící pro přenos zvukového signálu ze Směšovacího modulu. Piny 6 až 9 jsou označeny `control_voltage` a slouží pro stejnosměrné řídicí napětí například z hlasitostního modulu. 10 a 11 jsou rezervovány pro případnou I2C komunikaci mezi digitálními zařízeními. Zbylé piny jsou určeny jako rezerva.

pin	vodič
1	GND
2	V+
3	V-
4	analog_audio_1
5	analog_audio_2
6	control_voltage_1
7	control_voltage_2
8	control_voltage_3
9	control_voltage_4
10	I2C_SCL
11	I2C_SDA
12	Reserve_1
13	Reserve_2
14	Reserve_3
15	Reserve_4

3.6.1 Univerzální krabičky

Abych držel téma modularity, rozhodl jsem se navrhnout univerzální krabičky pro všechny moduly thereminu.

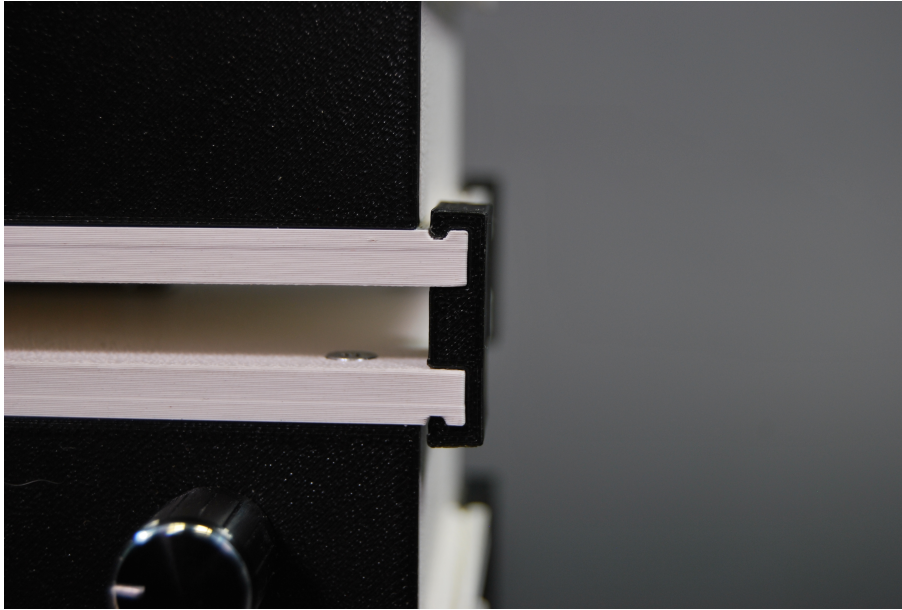
Krabičky mají všechny stejný spodní díl, ze kterého zároveň trčí pilíře pro přišroubování horního kusu. Horní kus mají také skoro všechny krabičky společný, jedinou výjimkou je tónový modul, u kterého je nežádoucí, aby měl kovový uzemněný konektor v okolí antény.

Mezi spodní a horní kus se zasouvají stěny, které se sešroubováním dvou horizontálních kusů upevní na místě.

Strany modulů jsou velice rozdílné, v závislosti na potřebných vstupech a výstupech jednotlivých modulů. Modulární systém umožňuje jednoduchou výměnu jedné strany v případě úpravy libovolného modulu, jako je například výměna konektoru, nebo změna typu antény.

Jednotlivé krabičky drží u sebe pomocí násuvných spojek, které se nasunou na lištičky na stranách každého z modulů a drží moduly ve vertikálním i horizontálním směru. K celkové stabilitě pomáhají i D-SUB konektory, které zamezují vysunutí modulu ze spojek.

Realizace všech krabiček je zobrazena na začátku kapitoly 4.



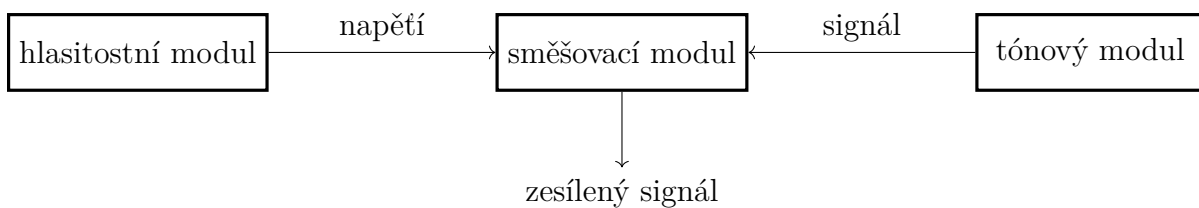
Obrázek 3.14: Upínací mechanismus modulů

3.7 Realizovatelná zapojení

Modulární systém jsem se rozhodl navrhnout s cílem maximální možné variace jednotlivých bloků. Z tohoto důvodu jsem si definoval různá potenciální primárně analogová i primárně digitální funkční zapojení, která mohou být realizovaná pomocí mnou vytvořených modulů.

3.7.1 Čistě analogové zapojení

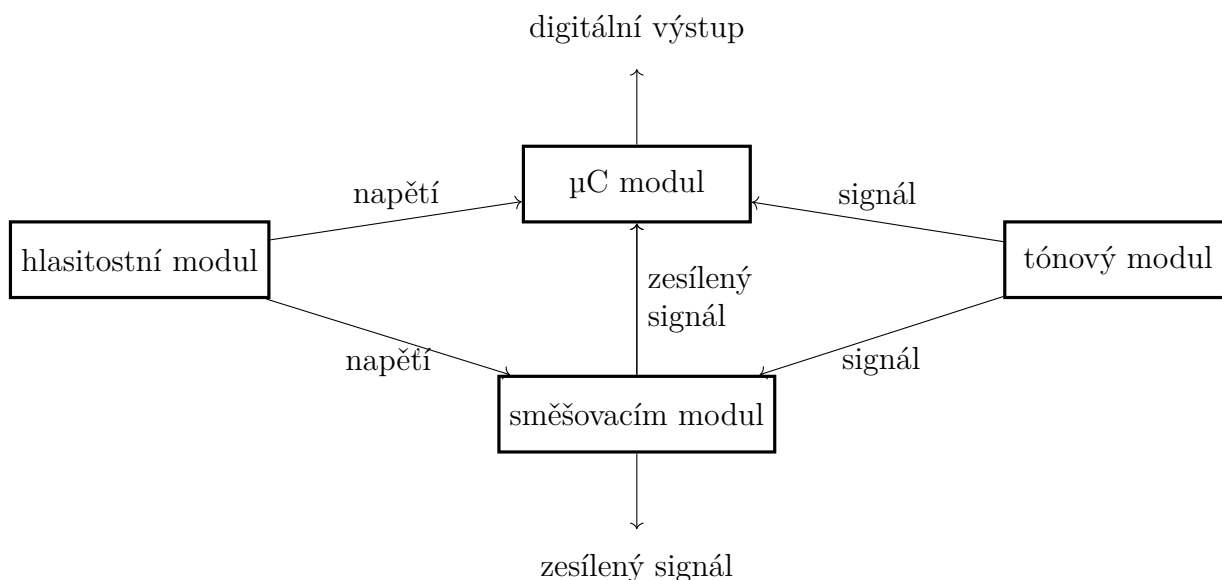
Prvním z možných zapojení je zapojení čistě analogové. V tomto zapojení se jedná typické zapojení popsané v kapitole 2.2.



Obrázek 3.15: Čistě analogové zapojení

3.7.2 Analogově-digitální zapojení

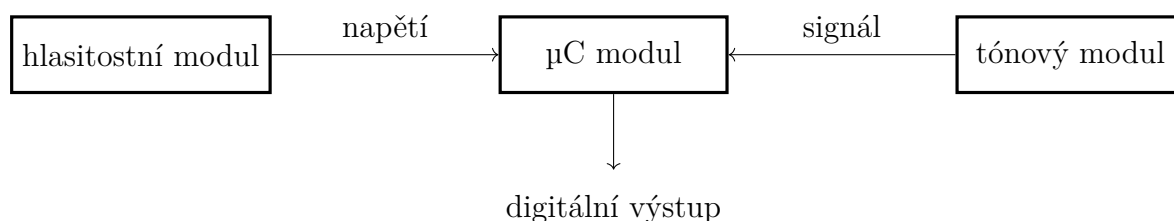
V tomto zapojení je paralelně k směšovacímu modulu přidán μC modul, ten může provádět analýzu signálu přímo z hlasitostního modulu či již zkresleného zesíleného signálu ze směšovacího modulu a umožnit digitální výstup dat analýzy a samotného signálu pomocí kabelu či bezdrátově.



Obrázek 3.16: Analogově-digitální zapojení

3.7.3 Digitální zapojení

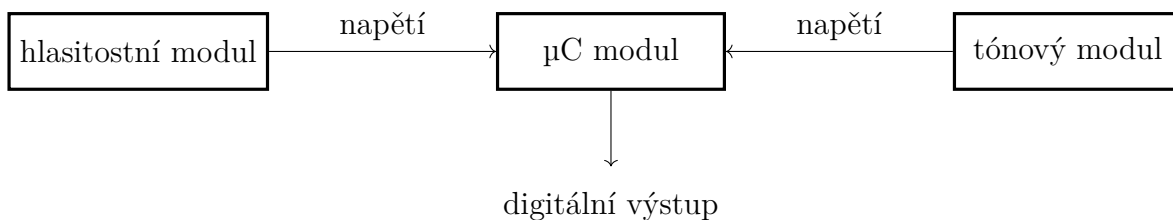
Digitální zapojení obsahuje jen μC modul, hlasitostní modul a tónový modul. Jedná se o zjednodušené analogově-digitální zapojení bez směšovacího modulu. Kvůli absenci směšovacího modulu neumožňuje analogové úpravy signálu.



Obrázek 3.17: Digitální zapojení

3.7.4 Napětově řízené digitální zapojení

Napětově řízené digitální zapojení může obsahovat dva či více tónových modulů. V tomto zapojení může theremin fungovat jako kapacitně řízený ovladač. Může generovat softwareově definovaný signál, řízený pomocí přiváděných napětí, nebo fungovat jako ovladač externích zařízení.



Obrázek 3.18: Napětově řízené digitální zapojení

3.8 Antény

Při provádění rešerše tématiky thereminu jsem narazil na několik typů antén. Vzhledem ke zamýšlené modularitě svého návrhu jsem se rozhodl vytvořit jednotlivé typy a porovnat jejich vlastnosti.

3.8.1 Tyčové antény



Obrázek 3.19: Tyčové antény

První z mnou realizovaných typů antén byly tyčové antény, ty jsem se rozhodl vytvořit spájením topenářských měděných trubek. V případě tónové antény jsem se rozhodl použít jednu metrovou trubku. Kvůli poměrně ostrému zakončení trubek jsem připájel na trubku měděnou koncovku.

V případě hlasitostní antény jsem původně plánoval vytvořit anténu ohnutím jedné delší tyče jak doporučuje Bob Moog [6], po neúspěšných pokusech o ohnutí, kdy se mi tyč začala lámat, jsem se rozhodl pro použití dvou rovnoběžných tyčí na konci spojených dvěma měděnými fitinkami. Pro spájení jednotlivých částí jsem v obou případech použil hořák na pájení okapů.

Připojení antén ke zbytku obvodu jsem původně plánoval pomocí závitů, nicméně při realizaci jsem zjistil, že trubky drží velmi dobře i při jemném nasunutí do koncovky, kolínka či redukce, kterou jsem se rozhodl použít jako velmi primitivní konektor pro anténu.

3.8.2 Planární antény

Nejjednodušší na výrobu, planární anténu jsem vyrobil pouze připájením vodiče ke kuprexitové destičce.

3.8.3 Sférická anténa

Sférická anténa, jak už název napovídá, má tvar koule. Původně jsem zamýšlel vytvořit anténu, která by měla kulový tvar a stála by na thereminu na tenké noze.



Obrázek 3.20: Sférická anténa

Při hledání možného způsobu realizace jsem narazil na nerezové kovářské polotovary ve tvaru polokoule. Rozhodl jsem se tedy upustit od původního záměru v prospěch antény ve tvaru polokoule.

Anténa tvaru polokoule umožňuje schování přívodního kabelu a mechanismu uchycení, je skladnější a díky použití komerčního výrobku dobře dostupná. K připojení ke zbytku obvodu jsem se rozhodl využít měděný drát který jsem připájel na vnitřní stranu polotovarů. Připájení bylo poměrně obtížné, kvůli velké ploše a tepelné kapacitě antény. Po několika neúspěšných pokusech jsem použil pro předehřev hořák, při dostatečném zahřátí antény už cín velmi dobře držel.

3.8.4 Zhodnocení antén

U všech tří antén jsem otestoval jejich přibližné vlastnosti. Testování jsem provedl třemi způsoby. První a druhý způsob ze zaměřily na nalezení přibližné kapacity antén. V prvním případě byl přiveden bílý šum na vstup anténního obvodu (sériové kombinace cívky a antény), v druhém případě byla aplikována funkce "sweep" generátoru signálů. V obou případech jsem připojil mezi cívku a anténu osciloskop a sledoval amplitudu signálu a tvar spektra, na kterém byla viditelná rezonanční frekvence. Vzhledem ke známé hodnotě cívky jsem pak dopočítal hodnotu kapacity.

Třetí měření bylo zaměřeno na směrové vlastnosti. Na anténní obvod jsem přivedl sinusový signál o frekvenci blízké rezonanční frekvenci zjištěné předchozími měřeními. Připojil jsem osciloskop stejně jako v předchozích měřeních a sledoval jsem změnu amplitudy signálu v závislosti na pohybu ruky kolem antény.

Z měření vyšlo, že tyčová anténa měla kapacitu pod 20 pF a desková i polokoule měly kapacity v řádu vyšších desítek pF. Přesnou hodnotu jsem ovšem nemohl zjistit, jelikož se při tomto měření velmi silně projevila kapacita sondy.

Směrovost antén odpovídala předpokladům, tj. kulová byla nejvšesměrovější, tyčová byla taktéž poměrně všesměrová, nikoli však při přiblížení v ose antény, kde byl vliv ruky citelně slabší. Planární anténa byla nejmíň všesměrová, ale s nejvyšším dosahem.

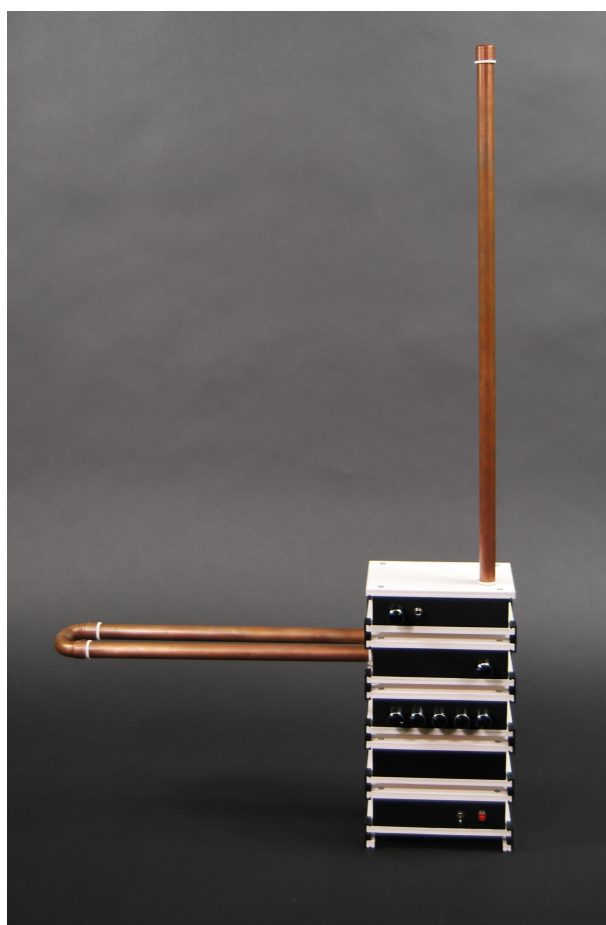
Linearitu vztahu kapacity na vzdálenosti se mi vzhledem k primitivnímu způsobu měření nepovedlo změřit.

Po sestavení funkčního prototypu tónového modulu pro tyčovou anténu jsem se rozhodl vyzkoušet zbylé dva typy antén na tomto modulu. Po připojení Polokulové antény jsem zjistil že na anténním obvodu bylo 100 V_{pp}. Vzhledem k vysokým napětím jsem se rozhodl, kvůli strachu o již funkční modul, nevyzkoušet planární anténu. Z krátkého testu při zapojení polokulové antény jsem zjistil, že se frekvence oscilátorů lišila natolik, že výstupní signál tónového modulu nebyl slyšitelný a nebylo jej možné naladit pomocí potenciometru.

Kapitola 4

Realizace

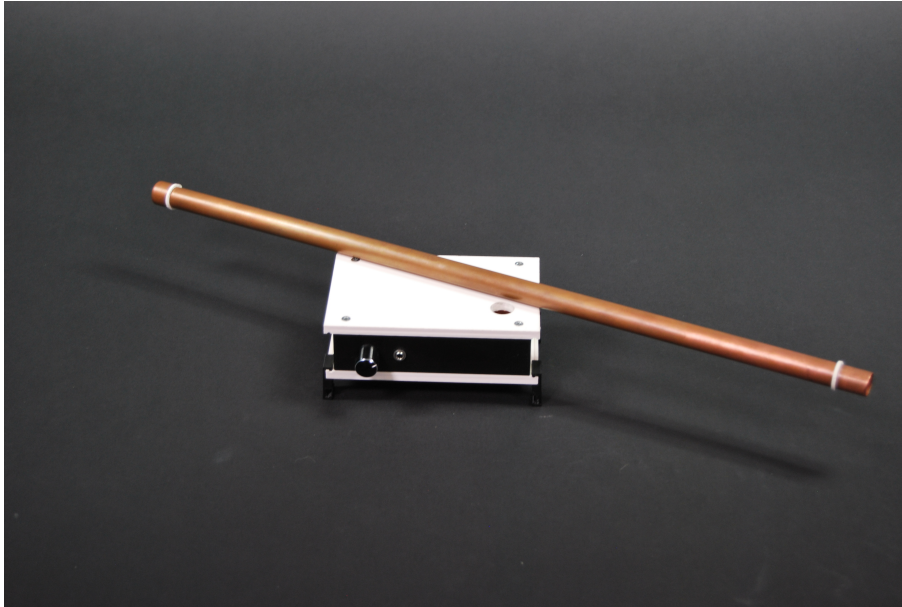
Celkem jsem zrealizoval pět modulů, jejichž princip jsem popsal v kapitole 3. V této kapitole je ukázána výsledná realizace těchto modulů.



Obrázek 4.1: Kompletní realizace thereminu

4.1 Realizace tónového modulu

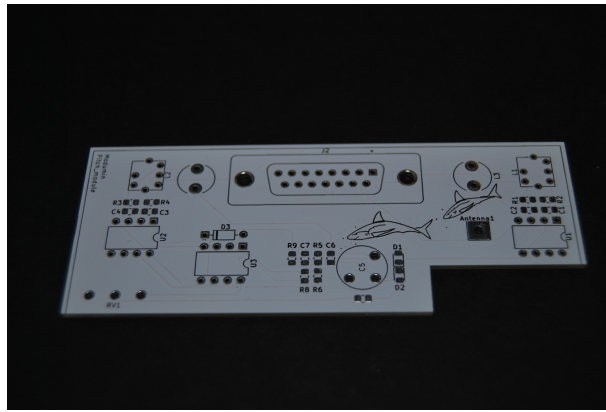
Pro tónový modul jsem navrhl desku plošných spojů zapouzdřenou v univerzální krabičce. Krabička má na přední straně potenciometr na ladění frekvence a výstup s 3.5mm jackem na sluchátka. Výstup na sluchátka je připojen přes kondenzátor a trimmer na analog_audio1. Kondenzátor odfiltrává stejnosměrnou složku a trimmerem je na výstupu nastavena napěťová hodnota přibližně $0.6 V_{pp}$. Tento výstup slouží na poslech při ladění, nebo může být využit jako výstup v případě použití thereminu v módu "pitch only".



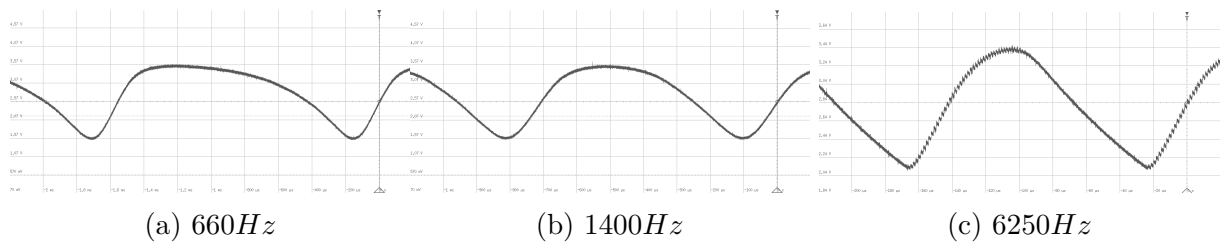
Obrázek 4.2: Realizace tónového modulu

Tónový modul má na rozdíl od ostatních modulů D-SUB spojení pouze na spodní straně, jelikož skrz horní stranu je vyvedena tyčová anténa.

Dosah modulu záleží na aktuálním nastavení frekvence, při práci na thereminu jsem pozoroval, že se frekvence měnila i při pohybu ve vzdálenosti okolo tří metrů od antény. Pro dosažení takového dosahu je však nutné theremin rozladit. Není překvapením, že na velké vzdálenosti má theremin velmi špatnou citlivost. Frekvenční rozsah je přibližně od 150 Hz do 12 kHz. Na vyšších frekvencích se signál zeslabuje a přestává být slyšitelný, na nižších frekvencích začíná být signál nepravidelný a začíná vytvářet místo souvislého tónu rázy.



Obrázek 4.3: DPS tónového modulu



Obrázek 4.4: závislost tvaru signálu na frekvenci

Výstupní signál tohoto modulu má, přes moje snahy o co nejčistší signál, poměrně nesymetrický tvar. Jak je vidět na grafech v obrázku 4.4, tvar se mění i v závislosti na frekvenci signálu. Na nižších frekvencích je signál zkreslován tak, že jeho náběžná hrana je poměrně strmá a sestupná hrana je pozvolná. Na vyšších frekvencích je sice tvar křivky symetričtější kolem osy y , ale spodní hrany signálu jsou ostřejší. Tato nedokonalost je ovšem zatelná pouze při použití thereminu v pitch only režimu. V případě připojení na směšovací modul může být tato nedokonalost odfiltrována a na výstupu může být signál velmi podobný sinu.

4.1.1 Antény tónového modulu

Při návrhu Tónového modulu jsem počítal s využitím všech výše zmíněných typů antén, při jejich testování jsem zjistil, že vzhledem k rozdílné kapacitě jednotlivých tvarů není možné, aby se pouhým přeladěním pomocí proměnných součástek dosáhlo dostatečného posuvu frekvence oscilátorů do frekvenční oblasti vhodné pro dané typy antén. Rozhodl, jsem se tedy realizovat pouze jeden tónový modul, bez možnosti výměny antény.

4.2 Realizace hlasitostního modulu



Obrázek 4.5: Realizace hlasitostního modulu

Hlasitostní modul je o něco jednodušší než modul tónový. Z přední strany má pouze jeden potenciometr, kterým se upravuje celková citlivost výstupního napětí na pohybu ruky.

V závislosti na nastavení potenciometru a přiblížení ruky se může napětí pohybovat od 0 až do 2 V. Tento výkyv je větší než zvládne zpracovat směřovací modul. Při nastavení potenciometru na maximum se hlasitost výstupního signálu ze směšovacího modulu začne chovat skokově.

Stejně jako pro tónový jsem pro hlasitostní vytvořil DPS, která nemá výstup pevně připojen na vodič D-SUB konektoru ale umožňuje výběr mezi `control_voltage_1` až `control_voltage_4`. Je tedy teoreticky možné poskládat theremin se čtyřmi řídicími napětími.

4.3 Realizace směšovacího modulu



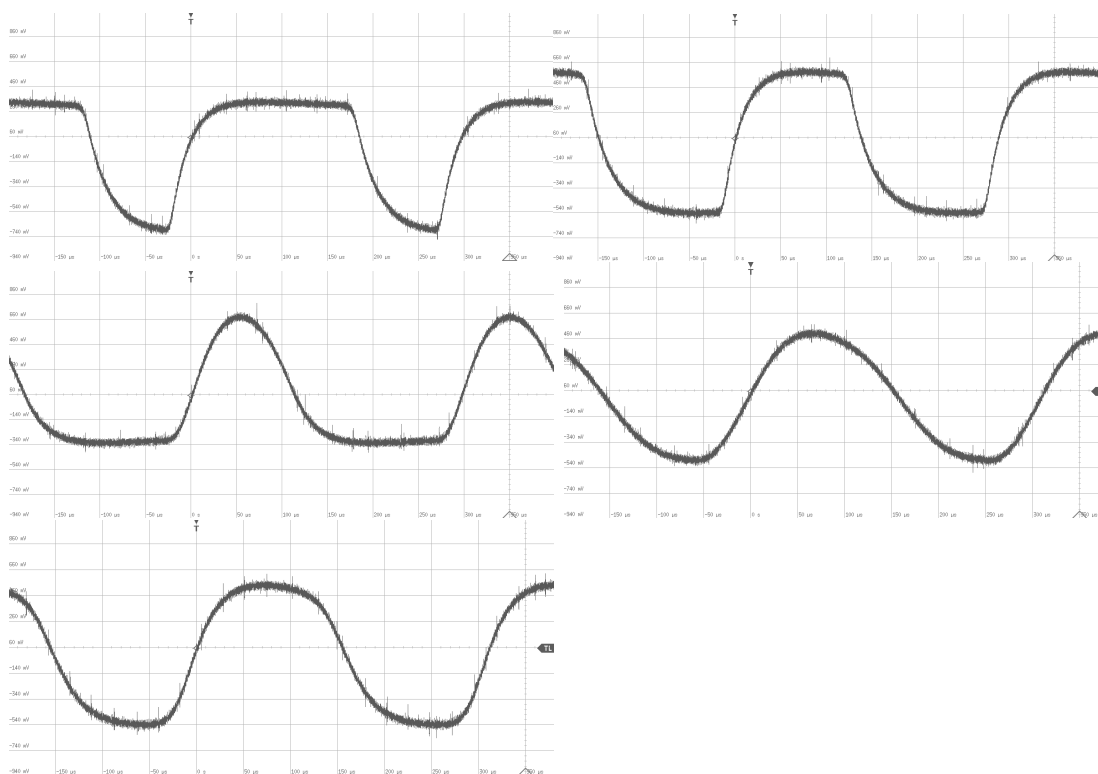
Obrázek 4.6: Realizace směšovacího modulu

Směšovací modul je na pohled asi nejsložitější. Na přední straně má pět potenciometrů. Prvním zleva upravuje jak daleko od hlasitostní antény musí být ruka, aby theremin začal hrát. Druhý, třetí a čtvrtý upravují barvu tónu.

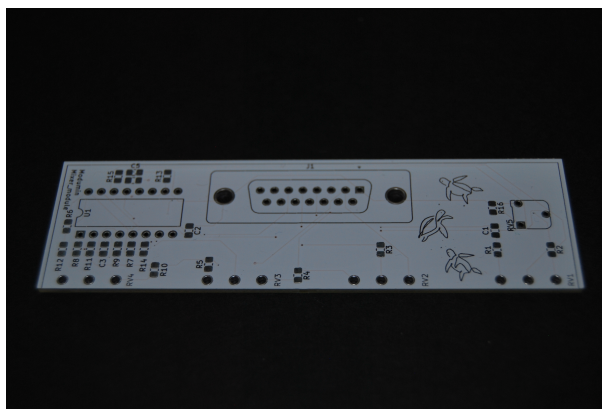
Druhý je v kapitole 3 označený jako "vertical_shift". Při jeho pohybu se mění "čistota" signálu. To je způsobeno klipováním signálu a do spektra se promítnou další harmonické složky.

Třetí označený jako "sharpness" upravuje ostrost signálu. Při nastavení do pravé krajní polohy je na výstupu signál ostrý s velkým množstvím vyšších harmonických. V levé pozici je na výstupu signál blízký sinu. Čtvrtý nastavuje zesílení. Při nastavení třetího potenciometru na maximum, upravuje čtvrtý tvar výstupního signálu mezi obdélníkem a původním signálem. Pátý pak ovládá hlasitost výstupního signálu.

Na zadní straně modulu je 3.5 mm jack na připojení reproduktorů či sluchátek.



Obrázek 4.7: Možné tvary signálu na výstupu směšovacího modulu

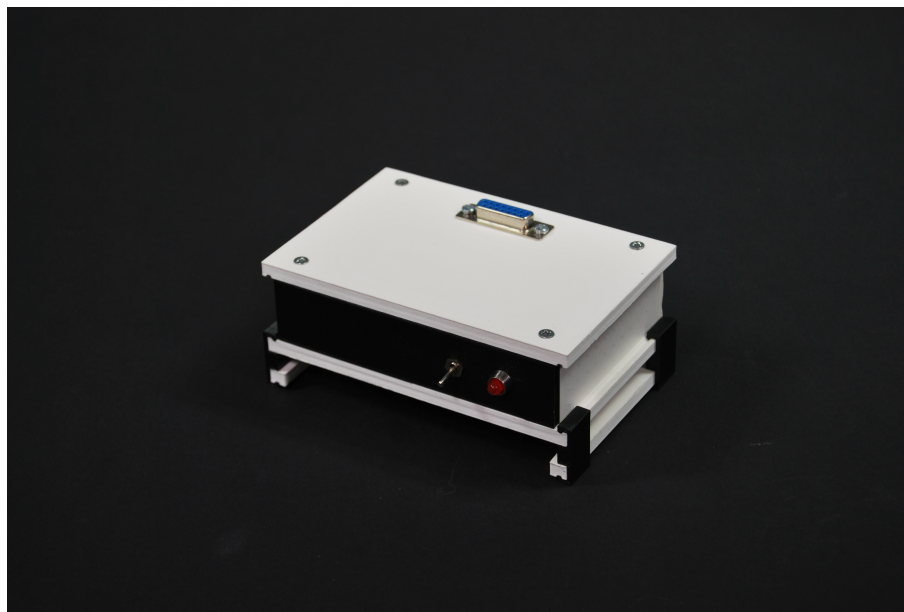


Obrázek 4.8: DPS směšovacího modulu

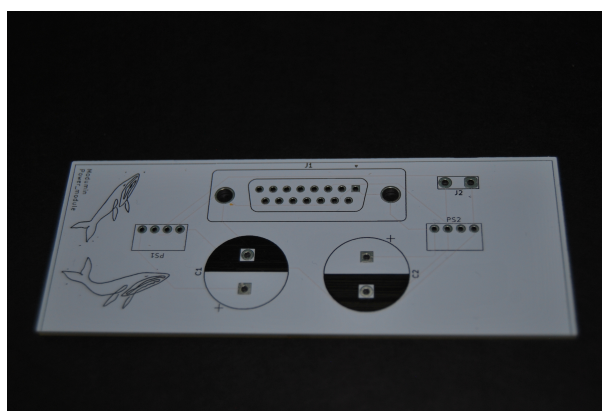
Za povšimnutí stojí, že na DPS jsou na přední straně pouze čtyři místa na připájení potenciometru. Původně jsem plánoval ovládat hlasitost potenciometrem pro zesílení. Při testování jsem zjistil, že theremin nepatrně hrál i při stažení zesílení na minimum. Zapojoval jsem tedy pátý potenciometr sériově s výstupním trimrem.

4.4 Realizace napájecího modulu

Napájecí modul je velmi jednoduchý na přední straně má páčku pro ovládání napájení, taster a signální LED. Na zadní straně je konektor na DC napájecí napětí a zdířka pro připojení zemnicího kolíku.



Obrázek 4.9: Realizace napájecího modulu



Obrázek 4.10: DPS napájecího modulu

Při realizaci jsem si všiml nemilého faktu, že na napájecích pinech D-SUB konektoru je místo $\pm 5 \text{ V} \pm 5,6$. Důvodem je použití levného spínaného zdroje, který poskytuje napájecímu modulu místo $12 \text{ V} 12,45 \text{ V}$. I samotných DC/DC konvertorů, které nejsou dokonalé a i při přivedení přesných 12 V poskytují přibližně $5,2 \text{ V}$.

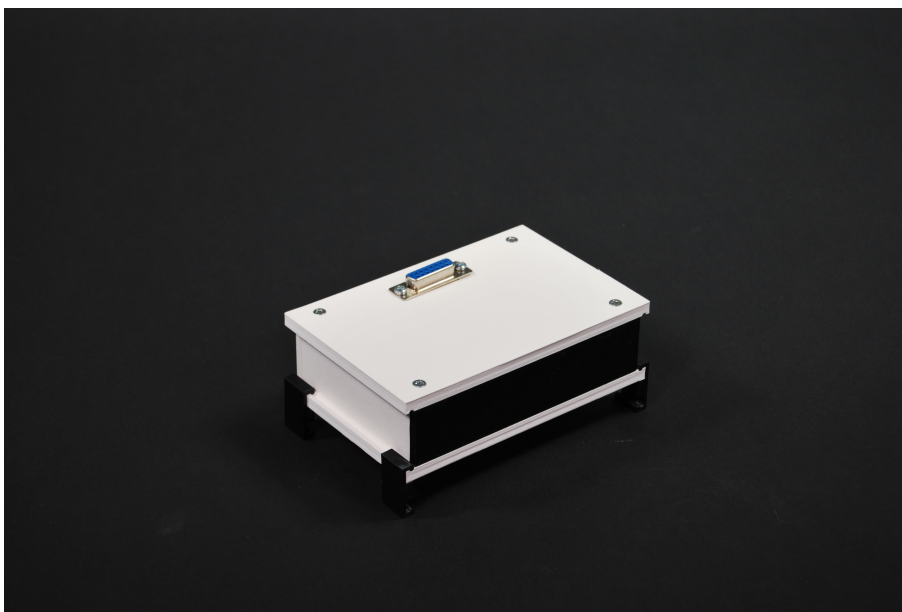
Napájecí napětí $5,6 \text{ V}$ je nevhodné jen pro μC modul, který jsem se z tohoto důvodu rozhodl napájet z vyvedeného USB. Tedy přímo z počítače, nebo z napájecího USB vývodu spínaného zdroje.

Díky použití externího zemnění a velkých kondenzátorů je napětí na napájecích vodičích tasteru stabilní a nevykazuje výrazný šum.

4.5 Realizace μ C modulu

MC modul vypadá z venku velmi stroze, uvnitř je však situace jiná. Centrálním prvkem je univerzální DPS do které je zasazeno Raspberry Pi Pico. Z toho je vyveden USB kabel na zadní stranu krabičky. Toto USB slouží pro napájení a programování Pica, zároveň může sloužit jako sériový výstup pro přenos informací.

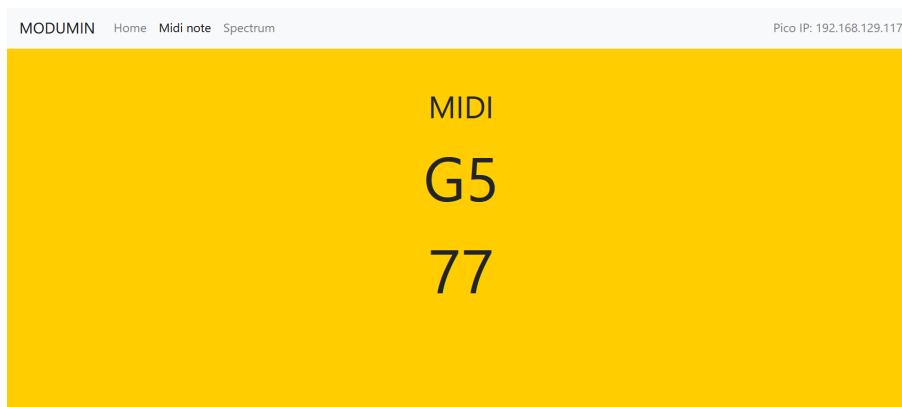
Na 1. pin (UART0 TX) je připojen podle MIDI 1.0 electrical guidelines [14] 5-PIN DIN MIDI konektor, který slouží k posílání MIDI zpráv. Na Piny 26 je připojeno analog_audio a na pin 27 připojen control_voltage. Tyto dva piny slouží jako analogový vstup.



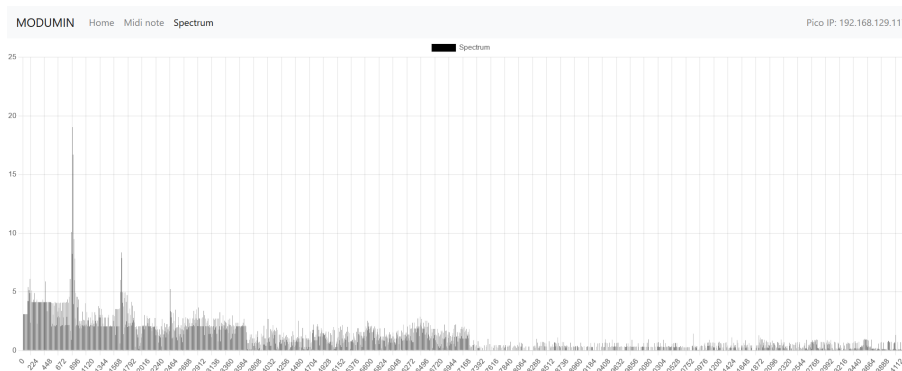
Obrázek 4.11: Realizace μ C modulu



Obrázek 4.12: Realizace μ C modulu zezadu



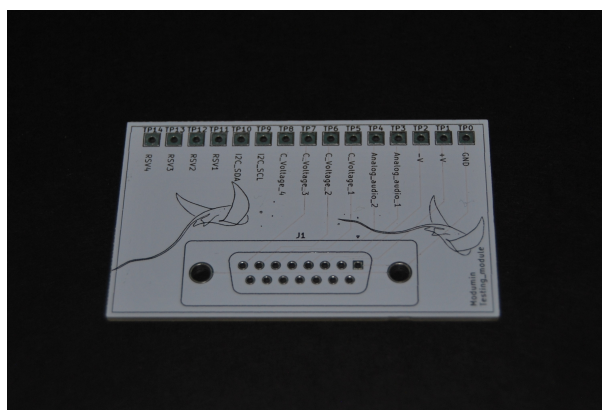
Obrázek 4.13: Webová stránka se zobrazenou notou



Obrázek 4.14: Webová stránka s vykresleným spektrem

4.6 Testovací destička

Pro testování a připojování externích zařízení jsem navrhl a nechal vyrobit i tuto jednoduchou DPS.



Obrázek 4.15: DPS testovací destičky

4.7 Vlivy DPS a parazitních kapacit

V této sekci bych rád vyzdvihl vliv prostředí a zapojení jednotlivých součástek na běh thereminu.

V raných fázích prototypování jsem stavěl oscilátory na nepájivém poli. Nepájivé pole se však ukázalo jako nevhodné řešení a to především kvůli nespolehlivosti zapojení a obecné náchylnosti na rozpojení při pohybu, další nevýhodou byly velké kapacity a obecná náchylnost na rušení.

Vzhledem k nevhodnosti nepájivého pole jsem tedy vytvořil svoje první funkční prototypy jednotlivých modulů na univerzální děrované DPS, podle těchto prototypů jsem navrhl finální DPS.

Velký vliv na běh thereminu mají parazitní kapacity. Dobrým příkladem byla například následující chyba.

Při sestavování prototypů na univerzální DPS jsem si neuvědomil nutnost přidání kondenzátorů na napájecí vstupy zesilovačů, tato začátečnická chyba se neprojevila na univerzální DPS, ale až při testování vlastních DPS. Po osazení vlastních desek byl na všech třech vodičích napájení šum o velikosti $2 V_{pp}$. Tento šum se pak projevil na všech signálech. Předpokládám že absenci šumu na univerzální DPS způsobily právě parazitní kapacity mezi drátky a plochami DPS. Domnívám se, že parazitní kapacity mají negativní vliv i na citlivost thereminu. Jelikož při eliminaci kabelů a sond v pozdních fázích testování jsem pozoroval větší frekvenční rozsah výstupního signálu a obecně lepší chování thereminu.

Kapitola 5

Závěr

V této bakalářské práci jsem se zaměřil na návrh, konstrukci, realizaci a testování modulárního hudebního nástroje thereminu, s cílem dosáhnout kvalitního výstupního signálu v širokém frekvenčním rozsahu a implementací digitálních i analogových výstupů.

V průběhu práce byly vytvořeny a analyzovány jednotlivé moduly, které dohromady tvoří funkční celek.

V teoretické části jsem se zabýval způsobem hry na nástroj, teoretickým rozložením jeho funkčních bloků, teoretickým základem pro návrh oscilátorů a směřováním signálů.

V kapitole Návrh modulárního thereminu byly použity poznatky z teoretické části na sestavení návrhu pěti modulů, jejich možným zapojením a návrhem zapouzdření modulů do modulárního systému krabiček.

V kapitole Realizace jsem pak představil jednotlivé realizace modulů a webové stránky určené k ladění a náhledu na hraný tón.

Byly navrženy a realizovány klíčové moduly: tónový modul, hlasitostní modul, směšovací modul, napájecí modul a modul s mikroprocesorem (μC modul). Každý modul byl navržen s ohledem na specifické požadavky a funkce, které musí plnit v rámci celého systému.

Tónový modul zajišťuje generování signálu ve frekvenčním rozsahu od 150 Hz do 12 kHz. I když se na extrémních frekvencích objevují jisté nedostatky, celkový výstup byl dostatečně kvalitní pro další zpracování.

Hlasitostní modul umožňuje plynulou regulaci hlasitosti, s výstupním napětím v rozsahu 0 až 2 V.

Směšovací modul umožňuje detailní úpravy barvy a čistoty tónu, což je klíčové pro dosažení požadovaného zvukového výstupu. Tento modul obsahuje několik potenciometrů pro jemné nastavení výstupního signálu.

Napájecí modul poskytuje stabilní napájení pro všechny ostatní moduly. Byly řešeny problémy s přesností napájecího napětí, aby bylo dosaženo co nejmenšího šumu a stabilního výkonu.

μC modul s Raspberry Pi Pico zajišťuje zpracování a vysílání MIDI signálů, čímž umožňuje integraci thereminu s moderními digitálními hudebními systémy a rozšíření jeho funkcionality.

Každý modul byl důkladně testován samostatně i v rámci celého systému. Testování odhalilo několik problémů, které byly následně řešeny, například drobné nesrovnalosti v napájecím napětí nebo zašumělý výstupní signál. Celkové výsledky ukazují, že nástroj je schopen generovat hudební signál, který může být dále upravován a zpracováván pro různé hudební aplikace.

Tato práce položila základy pro další vývoj a vylepšení thereminu. Možnosti dalšího rozvoje zahrnují změnu způsobu směšování v tónovém modulu, vylepšení digitální části, přesněji zlepšení způsobu načítání data, změnu programovacího prostředí pro plnohodnotný dvoujádrový běh, implementaci algoritmů pro složitější digitální zpracování signálu a detekci dominantní frekvence, dále integraci dalších digitálních funkcí a možností, jako je rozšíření MIDI funkcionality například na přenos přes Bluetooth a použití navržených hlasitostních či tónových modulů v nehudebních aplikacích například jako senzory vzdálenosti.

Závěrem lze konstatovat, že realizovaný hudební nástroj splňuje stanovené cíle a představuje funkční prototyp, který může být dále rozvíjen a zdokonalován.

Bibliografie

- [1] Moog Music Inc. *Setting up and playing the Moog Etherwave theremin*. URL: https://api.moogmusic.com/sites/default/files/2018-06/Etherwave_Theremin_Manual.pdf (citováno na straně 2).
- [2] Carmen Bachiller Martín et al. *Musical Applications of Electric Field Sensing*. Ún. 2012. DOI: 10.1155/2012/348151 (citováno na stranách 2–3).
- [3] Joseph Paradiso a Neil Gershenfeld. *Musical Applications of Electric Field Sensing*. Led. 1998. DOI: 10.2307/3681109 (citováno na straně 3).
- [4] Bob Moog. *Understanding, customizing, and hot-rodding your etherwave theremin*. 1996. URL: <http://www.suonoelettronico.com/downloads/HotRodEtherwav.pdf> (citováno na stranách 3, 5).
- [5] Kenneth D. Skeldon et al. *Physics of the Theremin*. Lis. 1998. DOI: 10.1119/1.19004. URL: https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article-pdf/66/11/945/11504963/945\1\1_online.pdf (citováno na stranách 3–4).
- [6] Bob Moog. *Build the EM Theremin*. 1996. URL: <https://www.cs.nmsu.edu/~rth/EMTheremin.pdf> (citováno na stranách 4, 6, 19, 24, 35).
- [7] Mandarin Electron. *Matryomi*. URL: <https://mandarinelectron.jimdofree.com/matryomin/> (citováno na straně 5).
- [8] Theremin Bollards. *Theremin Bollards*. URL: <https://thereminbollards.com/> (citováno na straně 6).
- [9] Dalibor Vojtěch. *Kovové materiály*. 2006. URL: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/001.html (citováno na straně 6).
- [10] Jiří Hospodka. *Elektornické obvody výukový materiál*. 2024. URL: <https://hippo.fel.cvut.cz/vyuka/soubory/ElektronickeObvody.pdf> (citováno na stranách 7–10, 21).
- [11] Václav Žalud. *Moderní radioelektronika*. BEN - technická literatura, 2000. ISBN: 80-86056-47-3 (citováno na stranách 7–12, 20).
- [12] Stefan Simrock a Zheqiao Geng. *Low-Level Radio Frequency Systems*. Břez. 2022. ISBN: 978-3-030-94418-6. DOI: 10.1007/978-3-030-94419-3. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/reader.action?docID=6904249&query=Low-Level+Radio+Frequency+Systems> (citováno na straně 12).
- [13] R.C. Li. *RF Circuit Design*. Information and Communication Technology Series. Wiley, 2012. ISBN: 978-1-118-30990-2. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=843665#> (citováno na straně 12).
- [14] MIDI Association. *MIDI 1.0 Electrical Specification Update*. 2004. URL: <https://mitxela.com/other/ca33.pdf> (citováno na stranách 15, 45).

- [15] MIDI association. *MIDI association tutorials*. URL: <https://www.midi.org/midi-articles/tutorials> (citováno na stranách 15–16).
- [16] Davide Baccherini, Donatella Merlini a Renzo Sprugnoli. „Tablatures for Stringed Instruments and Generating Functions“. In: čvn. 2007, strany 40–52. ISBN: 978-3-540-72913-6. DOI: 10.1007/978-3-540-72914-3_6 (citováno na straně 16).
- [17] Texas Instruments. *LM13700 datasheet*. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm13700.pdf?ts=1712317863529&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (citováno na straně 24).
- [18] Raspberry Pi Foundation. *Raspberry Pi Documentation*. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/raspberry-pi-pico.html> (citováno na straně 26).
- [19] Earle F. Philhower. *Arduino pico*. URL: <https://arduino-pico.readthedocs.io/en/latest/> (citováno na straně 26).
- [20] Adafruit industries. *Adafruit Zero FFT Library*. URL: https://github.com/adafruit/Adafruit_ZeroFFT (citováno na straně 26).

Příloha A

Příložené soubory

Do přílohy jsem vložil veškeré podklady k realizaci modulárního thereminu.

Složka "`\Priloha\Hardware\PCB`" obsahuje Kicad projekty (schémata i návrhy desek) pro tvorbu desek plošných spojů realizovaných modulů.

Složka "`Priloha\Hardware\3Dtisk`" obsahuje soubor `Modumin.scad`. Ten obsahuje zdrojový kód, 3D modelovaných krabiček thereminu. Lze jej otevřít v open source programu `Open scad`. Jelikož je tento dokument poměrně nepřehledný vygeneroval a přiložil jsem i `.stl` soubory univerzálních částí krabičky tj. horní, spodní a strany bez děr pro potenciometry či antény.

Ve složce "`\Priloha\Software\Pico_code`" je `modumin.ino` tedy Arduino IDE kód pro Raspberry Pi Pico.

V poslední řadě, složka "`\Priloha\Software\Webpage`" obsahuje zdrojový kód pro Pythonovou webovou stránku.