

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Konstrukce hudebního nástroje theremin**

**Jan Kovarovič**

**Plzeň 2016**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KOVAROVIČ**  
Osobní číslo: **E13N0013P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Konstrukce hudebního nástroje Theremin**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte princip činnosti hudebního nástroje Theremin.
2. Navrhněte konstrukční řešení hudebního nástroje Theremin.
3. Posuďte možnost řešení výstupu pomocí rozhraní MIDI.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

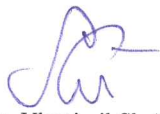
- 1. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce popisuje hudební nástroj theremin, jeho jednotlivé součásti a jejich funkce. Dále je práci úspěšně řešen převod výstupu thereminu do formátu MIDI se zachováním možnosti hrát glissando.

## **Klíčová slova**

theremin, rezonance, kapacita, indukčnost, rezonanční obvod, anténa, oscilátor, záznějový jev, frekvence, napětím řízený zesilovač, perioda, tón, hlasitost, MIDI

## **Abstract**

The engineer thesis describes musical instrument theremin, its part and the function of these parts. The conversion of theremins audio output to the MIDI data stream, with possibility of playing glissando intact, has been succesfully solved.

## **Key words**

theremin, resonancy, capacity, inductance, resonant circuit, antenna, oscillator, beat frequency, fequency, period, voltage controlled amplifier, pitch, volume, MIDI

### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 16.5.2016

Jan Kovarovič

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce ing. Oldřichu Turečkovi Phd., že se mnou měl trpělivost a přestože jsem nezačal nejlépe, mě vedl k dokončení práce.

## **Seznam symbolů a zkratk**

*f* .....frekvence

C .....kondenzátor

L .....cívka

R .....rezistor

D .....dioda

0xnn .....číslo v hexadecimálním formátu

float .....číslo s plovoucí řádovou čárkou

VCA .....Voltage controlled amplifier (Napětím řízený zesilovač)

MIDI .....Musical instruments data interface (Digitální rozhraní pro hudební nástroje)



## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1. HUDEBNÍ NÁSTROJ THEREMIN</b> .....	<b>11</b>
1.1 TEORIE FUNGOVÁNÍ THEREMINU.....	13
1.2 EVOLUCE THEREMINU A JEHO TYPOLOGIE.....	17
1.2.1 Analogové (klasické) thereminy.....	18
1.2.2 Digitální thereminy.....	19
1.3 THEREMINU PODOBNÉ NÁSTROJE.....	20
<b>2. NÁVRH A KONSTRUKCE THEREMINU</b> .....	<b>23</b>
2.1 NÁVRH THEREMINU.....	23
2.1.1 Řízení výšky tónu.....	23
2.1.2 Směšovač.....	27
2.1.3 Řízení hlasitosti.....	29
2.1.4 Zesílení signálu a výstup.....	31
2.2 PROTOTYP PRO REALIZACI MIDI KOMUNIKACE.....	33
2.2.1 Řízení výšky tónu a směšovač.....	34
2.2.2 Zesílení signálu a výstup.....	34
<b>3. VYUŽITÍ THEREMINU JAKO MIDI KONTROLÉRU</b> .....	<b>36</b>
3.1 MIDI PROTOKOL.....	36
3.2 MĚŘENÍ VÝSTUPU THEREMINU.....	38
3.3 PŘEVOD VÝSTUPU THEREMINU DO MIDI.....	39
3.3.1 Hardware.....	40
3.3.2 Software.....	41
3.4 DALŠÍ MOŽNÉ FUNKCIONALITY MIDI KONTROLÉRU.....	45
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>46</b>
<b>SEZNAM LITERATURY</b> .....	<b>47</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>48</b>
1. SCHÉMA ZAPOJENÍ REFERENČNÍHO OSCILÁTORU.....	48
2. SCHEMA ZAPOJENÍ VARIABILNÍHO OSCILÁTORU.....	49
3. SCHÉMA ZAPOJENÍ SMĚŠOVAČE.....	50
4. SCHÉMA ZAPOJENÍ OSCILÁTORU PRO ŘÍZENÍ HLASITOSTI.....	51
5. SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPĚTÍM ŘÍZENÉHO ZESILOVAČEM.....	52
6. CELKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	53
7. SCHÉMA ZAPOJENÍ PROTOTYPU.....	55
8. ZDROJOVÝ KÓD HLAVNÍHO PROGRAMU THEREMIN_FIN.INO.....	56
9. ZDROJOVÝ KÓD KNIHOVNY FREQMEASURE PRO MĚŘENÍ FREKVENCÍCH.....	61
9.1 Utils/FreqMeasureCapture.h.....	61
9.2 FreqMeasure.h.....	63
9.3 FreqMeasure.cpp.....	63

## **Úvod**

Předložená práce se zabývá návrhem a konstrukcí hudebního nástroje jménem theremin. A možností realizace výstupu z tohoto nástroje pomocí MIDI.

V první části práce je popsán nástroj samotný, je zde obecně vysvětlen princip fungování thereminu a jeho vznik. Dále se v první části práce také zmiňují různé varianty thereminu a některé alternativní konstrukce a thereminu podobné nástroje. Druhá část práce je věnována návrhu a konstrukci thereminu. V této části jsou podrobně popsány jednotlivé části navrženého nástroje. Podle tohoto návrhu, uvedeném ve druhé části, byl zkonstruován prototyp pro zkoušení funkcí hudebního nástroje. Na tomto nástroji pak bude testována možnost realizace výstupu z thereminu v podobě dat podle normy MIDI. Tato myšlenka, realizace výstupu thereminu jako MIDI rozhraní, je pak rozvinuta ve třetí části předkládané diplomové práce.

## 1. Hudební nástroj theremin



*Obr. 1.1: Theremin moderního typu, Moog Etherwave*

Theremin je velmi zvláštní a velmi zajímavý hudební nástroj, s charakteristickým vzhledem ale hlavně zvukem a jde o první plně elektronický hudební nástroj vůbec. Další charakteristickou vlastností tohoto nástroje je, že je bezdotykový, to znamená že nedochází k žádnému fyzickému kontaktu mezi hráčem a nástrojem. Pouze pohybem rukou v oblasti kolem antén, právě ty jsou tak charakteristické pro vzhled thereminu, řídí hráč výšku a hlasitost tónu (podrobnější popis v kapitole 1.1). Co je na thereminu nejvíce zapamatovatelné je jeho zvuk, který bývá často popisován jakoby z jiného světa, nadpozemský a podobnými přívlastky, a který uchvacoval a dodnes uchvacuje posluchače po celém světě. Pro tento svůj charakteristický elektronický zvuk byl theremin často ke slyšení v mnoha filmech žánru sci-fi, či s mysteriozní tematikou, hlavně v padesátých letech 20. století. Přestože theremin není sám o sobě příliš známý, jeho zvuk je snadno zapamatovatelný a svým způsobem i proslavený, i když málokdo ví co přesně onen charakteristický zvuk vydává. Jiná jména užívaná pro tento hudební nástroj byla například Ether wave, Aether-Vox.

[1]

Jméno theremin dostal tento hudební nástroj po svém konstruktérovi, jménem Lev Sergejovič Těremen, ve světě je známější pod pofrancouzštěnou verzí svého jména Léon

Thérein. Těremen se narodil roku 1896 v Petrohradu a zemřel roku 1993 v Moskvě, byl fyzikem, vynálezcem a také hudebníkem, kromě fyziky vystudoval totiž také hru na violoncello. Během svého života byl nucen byl vládou Sovětského svazu nucen k práci na špionážních zařízeních, například vymyslel metodu odposlouchávání pomocí infračerveného paprsku, který snímal chvění skla, také navrhl a zkonstruoval odposlouchávací zařízení jež bylo více než dvacet let ukryté a aktivní na americkém velvyslanectví v Moskvě. K vynálezu thereminu došlo v podstatě náhodou. Od roku 1919 pracoval profesor Těremen ve fyzikálně-technickém institutu v Petrohradě, kde si při práci na detektoru pohybu povšiml že jeho přítomnost, má vliv na frekvenci vysokofrekvenčních elektronkových oscilátorů. Respektive šlo o pohyb jeho ruky mezi dvěma těmito oscilátory, kdy si povšiml toho, že zařízením vydává hučivý tón. V roce 1920 pak profesor Těremen představil svůj hudební nástroj, který nazval *Etherphone* nebo také *termenvoksa*. Celosvětově se tento nástroj dostal do povědomí pod názvem Theremin. Na konci 20. let 20. st poskytl patent na komerční výrobu thereminu americké společnosti RCA, která stihla vyrobit 500 kusů zařízení, než byla výroba kvůli Velké hospodářské krizi ukončena. [2, 3]

Dle původní představy profesora Těremena měl tento nástroj způsobit revoluci v kompozici hudby, ve složení a zvuku orchestrů a umožnit takřka každému, aby se stal hudebníkem. Bohužel skutečnost byla taková, že výroba thereminů byla předčasně ukončena kvůli krizi. Navíc hraní na tento nástroj ač zní v principu jednoduše, vzdálenost ruky od jedné antény udává tón, od druhé jeho hlasitost, je ve skutečnosti velmi složitá záležitost, kterou doopravdy ovládlo jen pár lidí. Je to právě ona absence jakýchkoliv fyzických prvků, jako je třeba klaviatura piána nebo klapky dechových nástrojů, která činí zvládnutí tohoto nástroje tak složitým. Tón, který bychom chtěli na theremin hrát je totiž třeba slyšet přesně, to znamená, že hráč musí mít skutečně dobrý takzvaný „hudební sluch“, aby, jak se říká, vytáhl tón ze vzduchu. Navíc jeho pohyb musí být velmi přesný, protože antény thereminu jsou hodně citlivé a reagují už i na hráčovu přítomnost. Jistá revoluce se ovšem konala přibližně o třicet let později, když inženýr Robert Moog zkonstruoval svoji verzi thereminu (moog etherwave, moderní verze: obrázek 1.1) a následně na základě zkušeností s thereminem začal konstruovat a prodávat první syntezátory.[2, 3]

## 1.1 Teorie fungování thereminu

Jak již bylo nastíněno v předchozí kapitole, při zmínce o náhodě jež vedla ke vzniku tohoto hudebního nástroje, základním principem hraní na theremin je vliv lidského těla na frekvenci s níž kmitá oscilátor. Rezonanční frekvence je totiž nepřímo úměrná kapacitě

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

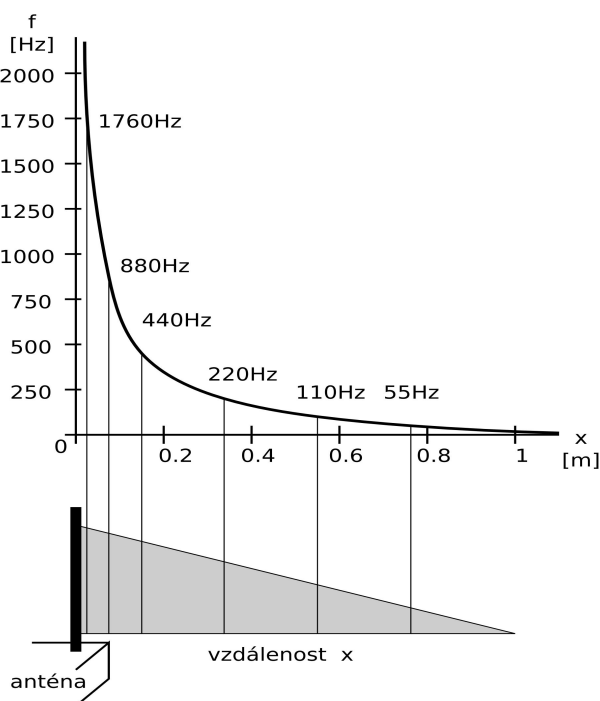
v obvodu (1) a tím pádem se se změnou kapacity mění rezonanční frekvence. Anténa thereminu a ruka hudebníka fungují jako variabilní kapacita v obvodu oscilátoru, kde anténa je elektroda s potenciálem a ruka hráče tvoří uzemněnou elektrodu. Celková kapacita této

$$C_A(\infty) = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\log\left(\frac{2h}{d}\right) - k} \quad (2)$$

antény je dána vztahem (2), kde  $h$  a  $d$  jsou výška a průměr antény v metrech, a  $k$  je konstanta pro vzdálenost antény od země. Přírůstek kapacity v závislosti na vzdálenosti ruky od antény

$$\Delta C_A(x) \approx \frac{\pi\epsilon_0 h}{10\log\left(\frac{4x}{d}\right)} \quad (3)$$

je pak možno odvodit ze standardních výsledků pro dva válcové kondenzátory (3), kde  $d$  je



Obr. 1.2: Příklad závislosti frekvence na vzdálenosti (převzato z [4])

průměr antény a  $x$  je vzdálenost ruky od antény, obě hodnoty musí jsou dosazovány v metrech. Přírůstek kapacity,  $\Delta C$ , je tím větší čím je ruka blíže k anténě. Princip závislosti kapacity kondenzátoru na vzdálenosti jeho elektrod se také využívá v kapacitních senzorech vzdálenosti, a theremin je vlastně takovým senzorem vzdálenosti, protože tón je určen vzdáleností ruky hráče od antény (Obr. 1.2). Změna kapacity, kterou vytvoříme pohybem ruky v okolí antény je v řádu pikofaradů, tedy velmi malá.

Pokud bychom použili oscilátor, který bude kmitat ve slyšitelném pásmu, 20 ~ 20 000 Hz, bude výsledná změna kmitočtu velmi malá a sluchem nerozeznatelná. Pokud chceme, aby byla vyvolaná změna kmitočtu větší, je nutno použít oscilátor, který bude kmitat s řádově vyšší frekvencí, například stovky kHz až jednotky MHz. Jenže tyto frekvence jsou mimo slyšitelný rozsah, přestože samotná změna frekvence by už byla vnímatelná jako posun v tónu. Aby byl výstup z thereminu slyšitelný je v jeho zapojení využít záznějový jev. Signál oscilátoru řízeného anténou je smíšen se signálem lokálního (referenčního) oscilátoru a

$$V_{out} = A_1 A_2 \sin \omega_1 t \sin \omega_2 t \quad (4)$$

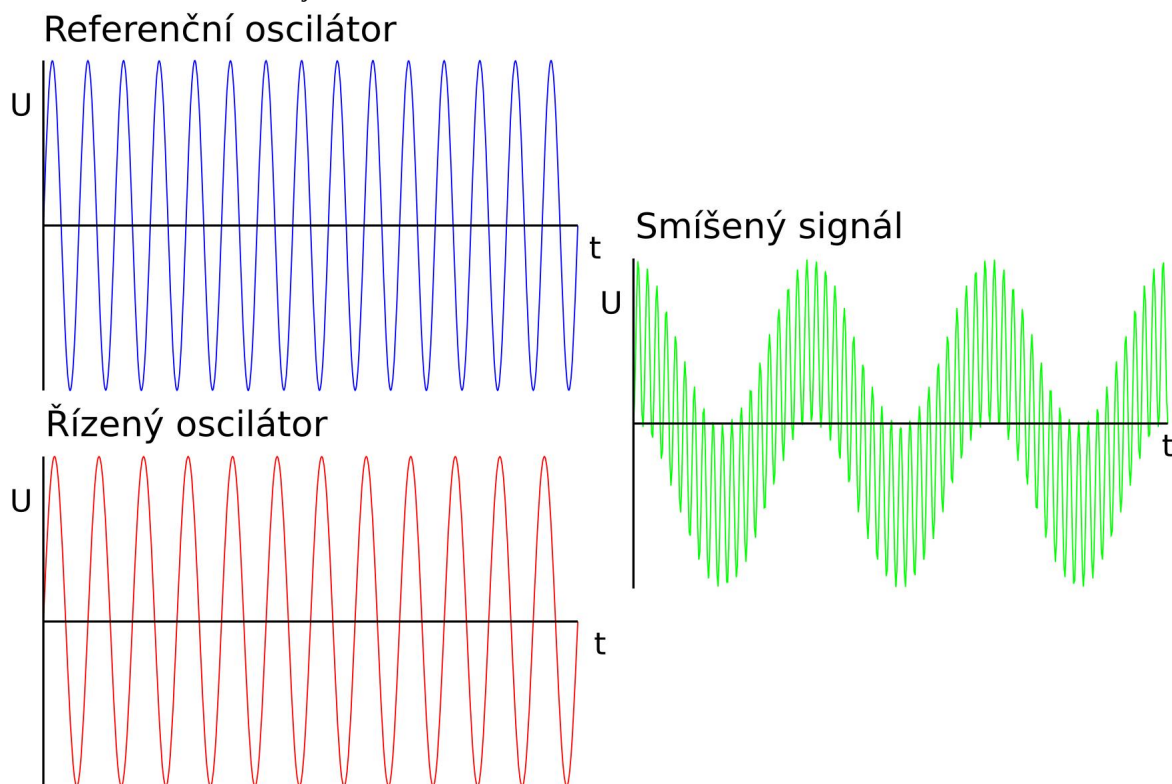
$$V_{out} = \frac{A}{2} [\cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t] \quad (5)$$

výstupem je rozdíl frekvencí těchto dvou oscilátorů. Použitý směšovač může být buď multiplikativního (viz Obr 1.3) nebo aditivního charakteru. Výsledný signál po multiplikativním smíšení (vynásobení signálu) vyjde podle vztahu (4). Tento vztah může být rozšířen pomocí standardních trigonometrických vzorců (5), kde vidíme dvě frekvenční složky signálu, rozdílovou a součtovou. Pro smíšení signálu v aditivním směšovači (součet

$$V_{out} = \sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t) \quad (6)$$

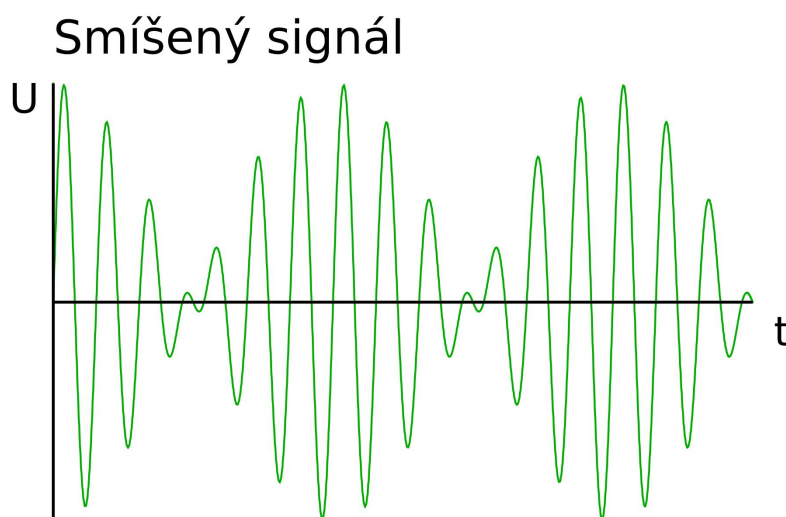
$$V_{out} = 2 \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right) \quad (7)$$

signálů) platí vztah (6), po rozložení tohoto vztahu pomocí trigonometrických vzorců lze vidět že součet signálů také obsahu součtové a rozdílové složky (7), výsledný produkt je ukázán na obrázku (Obr. 1.4). U aditivního (součtového) směšování je nutné použít nelineární směšovací prvek, výsledný signál pak obsahuje kromě součtové a rozdílové složky i vyšší harmonické násobky součtu a rozdílu. Signál vytvořený multiplikativním směšováním tyto vyšší harmonické neobsahuje. Filtrem dolní propusti je posléze ze smíšeného signálu odstraněna jeho součtová složka a k dalšímu zpracování tak postupuje jen signál s rozdílovým



Obr. 1.3: znázornění znásobení signálů

kmitočtem  $(f_1 - f_2)$ , který se už nachází ve slyšitelném rozsahu. Tento signál je následně zesílen v napětím řízeném zesilovači a odeslán na zvukový výstup, např. pro reproduktory nebo sluchátka.

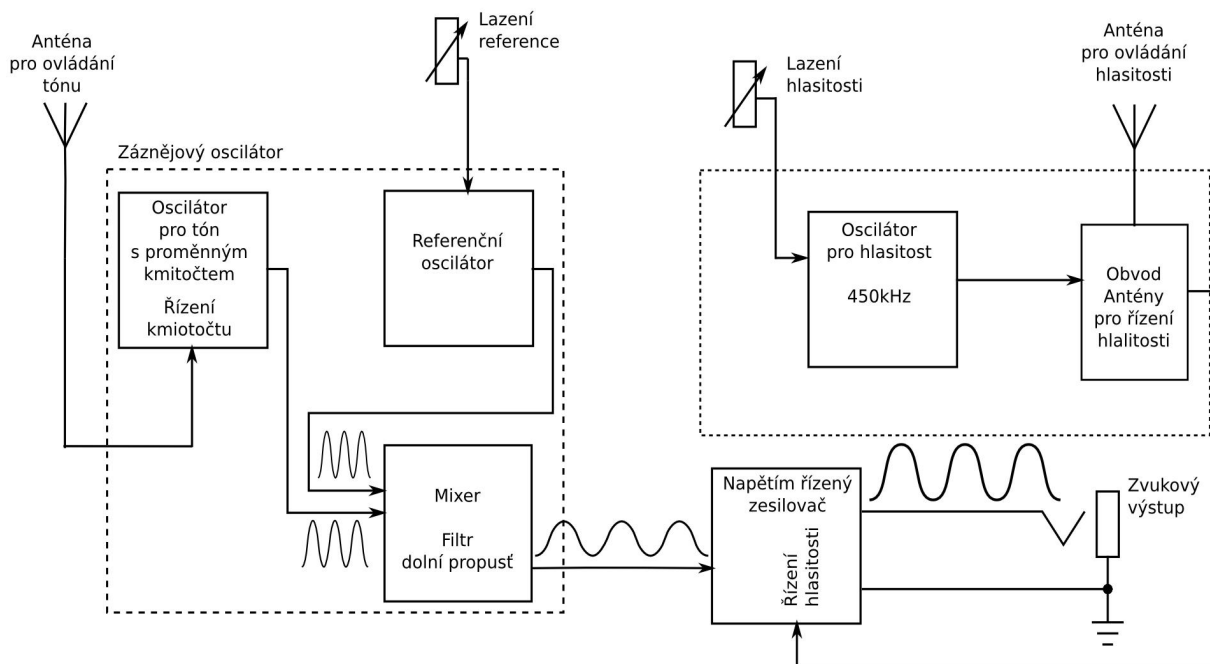


Obr. 1.4: Ukázka signálu po aditivním směšování

Řídící napětí pro napětím řízený zesilovač je určeno jako úbytek napětí vyvolaný rezonančním proudem, který protéká obvodem antény. U jednodušších verzí thereminu, u kterých se anténou ovládá pouze výška tónu je hladina řídicího napětí pro zesilovač realizována jednoduše pomocí potenciometru. Velkým problémem nejen u thereminu, ale u záznějových záznějových oscilátorů obecně, je vzájemná synchronizace frekvencí, je-li jejich rozdíl příliš malý a zároveň mají oscilátory malou hodnotu  $Q$  (větší šířka frekvenčního pásma pro kterou se obvod dostává do rezonance). V tomto případě se může stát že oba oscilátory budou kmitat na společné, stejné, frekvenci. K synchronizaci dochází proto, že oscilátory se vzájemně ovlivňují přes kapacitní a induktivní vazby, a tím dochází k elektromagnetickým přeslechům. Tento jev se dá omezit pomocí přidání stínění mezi řízený a referenční oscilátor a prostorovým oddělením uvnitř skříně nástroje. Dále je třeba aby všechny oscilační obvody byly řádně připojeny na společný zemní potenciál, stejně musí být uzemněno i napájení thereminu. Dalším problémem jsou proudové špičky při skokové změně frekvence oscilátoru, které je třeba eliminovat pomocí indukčnosti přidané do série k napájení oscilátoru, která slouží k omezení napěťových rázů, a paralelně připojené kapacity mezi napájení a zem, která bude uzemňovat vysokofrekvenční proud, toto oddělení napájení musí být provedeno co nejbližší napájecím vstupům oscilátoru. [4]

U různých variant thereminu, odlišných z hlediska použitých součástek nebo způsobů realizace jednotlivých obvodů, se bude vnitřní zapojení jednotlivých bloků lišit, principiálně však bude jejich funkce stejná. A jednotlivé funkční bloky budou odpovídat blokovému schématu níže (*Obr. 1.5*). Například, v klasických thereminech jsou použity LC oscilační obvody, ať už jde o Colpittsovi obvody pro jednoduché doma stavěné thereminy nebo složitější propracovanější oscilátory s důrazem na stabilitu frekvence a kvalitu průběhu v průmyslově vyráběných thereminech. Další možností použít jako oscilátor klopné obvody zapojené jako generátory pulzů (relaxační generátory). Způsob řízení frekvence a hlasitosti je v principu stejný, ruka a anténa představují proměnnou kapacitu připojenou do obvodu, liší se pouze způsob jakým jsou uvnitř generovány kmity. [4]





Obr. 1.5: theremin - blokové schéma (převzato z [5])

## 1.2 Evoluce thereminu a jeho typologie

Tak jako všechny ostatní hudební nástroje i theremin prošel jistým vývojem a vzniklo tak několik různých variant s rozdílnou konstrukcí. Na rozdíl od jiných hudebních nástrojů měl theremin na tento vývoj méně času, poprvé byl představen v roce 1913, ale díky rychlému pokroku v oblasti elektroniky byly změny častější. Základní princip zůstal stejný, měnila se ale konstrukce, použité součástky a způsob zpracování vnitřního obvodu. V dnešní době může být theremin i plně digitální, sestaven z integrovaných obvodů nebo naprogramován jako software. V dnešní době existuje mnoho variant thereminů, všeobecně je možné thereminy rozdělit do dvou velkých skupin, i když se tyto skupiny vzájemně překrývají.

- **analogové**
- **digitální**

Hlavně z důvodu že klasický theremin by měl být výhradně analogový, ale může obsahovat dodatečné integrované obvody pro digitální zpracování zvuku, které vylepšují klasický theremin o další funkce. Ale můžeme říct, že toto rozdělení závisí na typu oscilátoru.

### 1.2.1 Analogové (klasické) thereminy



Obr. 1.6: RCA theremin, originální theremin podle návrhu profesora Těremina (převzato z: [http://www.thereminworld.com/files/photos/14697/IMG\\_5508.jpg](http://www.thereminworld.com/files/photos/14697/IMG_5508.jpg))

První thereminy konstruované podle návrhu profesora Těremina, které, na přelomu 20. a 30. let 20. století, podle jeho patentu vyráběla americká společnost RCA měly rezonanční obvody realizované pomocí elektronek a velkých indukčností se vzduchovým jádrem. Obvod pak byl umístěn do poměrně velké dřevěné skříňe (Obr. 1.5). Jak už bylo zmíněno, těchto thereminů bylo vyrobeno jen 500 kusů, které se ale neprodávaly příliš dobře, za jedno kvůli hospodářské krizi a také kvůli tomu že hra na theremin vyžaduje poměrně velkou hudební intuici, respektive dobrý hudební sluch. Jejich výroba už nebyla společností RCA obnovena. V 50. letech 20. století se začal o tento hudební nástroj zajímat Robert Moog, budoucí konstruktér prvního syntezátoru a zakladatel společnosti Moog Music Inc., který začal stavět své vlastní thereminy, ve kterých nahradil elektronkové obvody tranzistory vytvořil tak moderní theremin (viz. Obr. 1.1), je samozřejmé že první Moogovi theremini se

od současných lišily, především v použitých součástkách. Protože na trh přicházely nové, lepší tranzistory, některé pasivní součástky se přestaly v průběhu času vyrábět, atd., dalším důvodem je neustálé doladování a zlepšování vlastností finálního výrobku, hlavně v oblasti stability oscilátorů a vhodného rozložení stupnice ve vzduchu (viz Obr 1.2). Další možností je místo klasického LC oscilátoru, který je použit ve většině thereminů, využít RC oscilátory, např oscilátor s Wienovým můstkem nebo krystalový oscilátor.

### 1.2.2 Digitální thereminy

S pokrokem v oblasti elektroniky a výroby integrovaných obvodů je nasnadě další možnost jak sestavit theremin, nahrazením LC a RC oscilátorů relaxačním generátorem. Ale princip jakým tento theremin funguje je stále stejný. Frekvence tónu je opět tvořena dvěma oscilátory, v tomto případě generátory pulzů, z nichž jeden je nastaven na pevnou frekvenci a druhý je laděn pomocí antény. Signály z relaxačních generátorů jsou porovnávány na hradle exkluzivního součtu (XOR). Oproti klasickým thereminům je výstup z tohoto obvodu převáděn pomocí integrátoru na hladinu napětí, velikost napětí potom slouží k řízení generátoru kmitočtu, který má za úkol generování sinusové křivky. Výhodou tohoto řešení je jeho jednoduchost, není potřeba řešit ladění obvodu kvůli indukčností, která způsobuje spoustu problému u klasických thereminů a z hlediska udělej si sám řešení jsou správné indukčnosti špatně k sehnání, a celkově jde o jednodušší obvod. Další výhodou je že generátor křivky nemusí generovat jen sinusovou křivku, ale například i obdélník nebo pilu. Nevýhodou jsou omezení integrovaných obvodů, způsobující že takto řešený theremin má potíže s generováním tónů v blízkosti horní a dolní hranice slyšitelnosti. A kvůli použité technologii není oblíben u zastánců klasických thereminů. Pro použití thereminu jako MIDI kontroléru má však toto řešení jednu výhodu. Řídící napětí, které určuje výšku tónu napětím řízeného oscilátoru, může být snadno měřeno a převáděno do podoby MIDI dat. Od takového řešení je už jen krok k úplné softwarové emulaci, kde ke generaci tónu a ovládání jeho hlasitosti postačí jakékoli dvě proměnné. Ale toto už v podstatě není theremin ale syntezátor, ať už analogový, digitální nebo softwarový. Jenže theremin vlastně je syntezátor. Je to první elektronická hudební nástroj a syntezátor vůbec a tento nástroj byl inspirací pro Roberta Mooga, díky které vytvořil první syntezátor jak známe dnes, a dal tak vzniknout novému způsobu jak hrát a tvořit hudbu.

Dalším kritériem podle kterého je možné rozlišovat druhy thereminů je počet antén.

- Normální theremin se dvěma anténami, pro tón a hlasitosti
- zmenšený (zjednodušený) theremin, u kterého je anténou řízena pouze výška tónu. Hlasitost je nastavována potenciometrem

V současné době se komerční výrobou thereminu zabývá již zmíněná společnost Moog Music Inc., dále Arthur Harrison Instruments nebo PAiA.

### **1.3 Thereminu podobné nástroje**

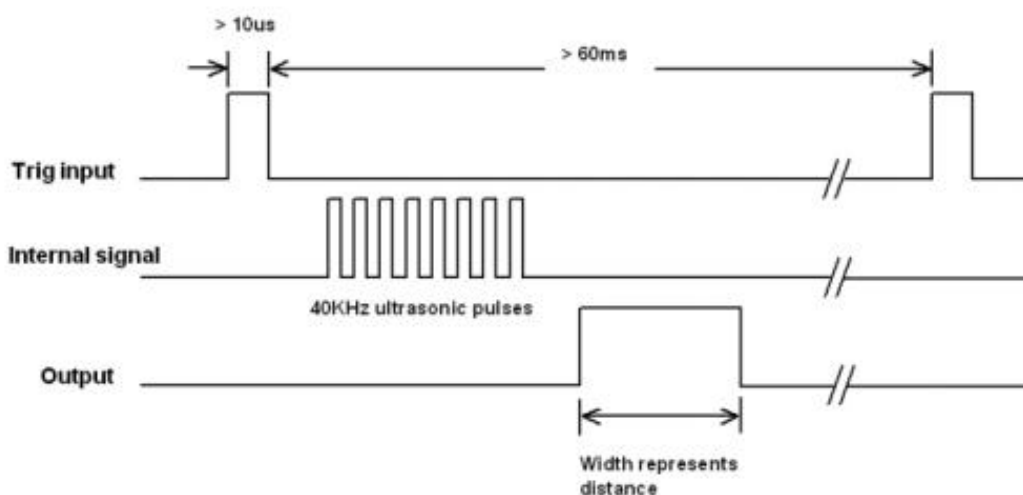
Další obměnou v designu thereminu je nahrazení kapacitního snímání vzdálenosti, tj. antén, jiným způsobem měření. Otázkou je nakolik jsou tyto nástroje ještě thereminem, proto samostatná kapitola se jménem thereminu podobné nástroje. Podle některých pohledů není theremin v pravém slova smyslu ani v předchozí kapitole zmínění digitální theremin, ale theremin jsou pouze nástroje postavené podle původního návrhu profesora Těrmena nebo pozdější verze Roberta Mooga, tedy nástroje kde zvuk vzniká smíšením dvou harmonických oscilátorů, z nichž jeden je ovládán proměnou kapacitou antény. Kromě toho existují další nástroje, které stejně jako theremin umožňují plynulou změnu hraného tónu. Ty budou také zmíněny v této kapitole.

Pro modifikaci thereminu použitím jiného způsobu snímání vzdálenosti, jsou použitelná v podstatě jakákoliv čidla vzdálenosti jejichž výstupem je elektrická veličina. Nejčastěji se v těchto aplikacích, přičemž jde převážně o výtvary hobbystů, můžeme setkat s použitím ultrazvukových nebo infračervených čidel.

- **Theremin s ultrazvukovým čidlem**

Zásadní nevýhodou těchto čidel pro použití v thereminu je skutečnost, že neměří kontinuálně. Čidlo pracuje v cyklech, vyšle pulz a čeká na odpověď, vzdálenost je vyhodnocena na základě toho za jak dlouho se odražený pulz vrátí zpátky. Výstupem je napěťový pulz jehož délka odpovídá vzdálenosti. Další problém ultrazvukových čidel je, že pulz se od dlaně může odrazit špatně a nevrátit se tak zpět na přijímač. Dále má běžně dostupné ultrazvukové čidlo poměrně malé rozlišení, přibližně 2.5cm a minimální vzdálenost od které měří zhruba zhruba 20cm. Všechny tyto nevýhody

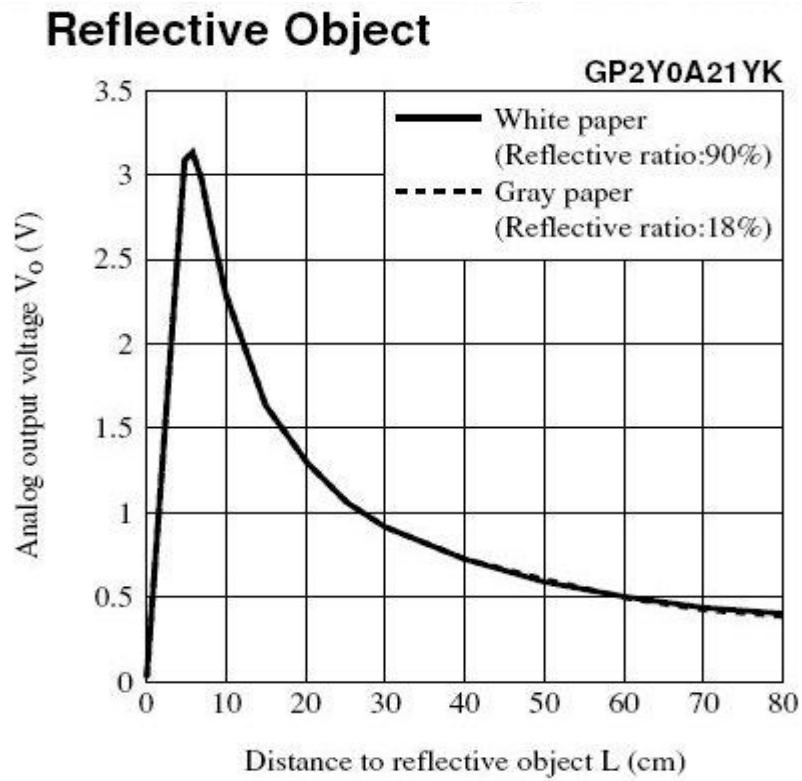
jsou ovšem pro použití v nekomerční aplikaci zanedbatelné, navíc musíme počítat s tím, že reakční doba člověka je přibližně 100ms, takže můžeme počítat s jistou setrvačností a tím zmenší dopad nekontinuálního měření. Výhodou tohoto čidla je jeho linearita závislosti výstupní veličiny na vzdálenosti, což velmi usnadňuje zpracovávání naměřených hodnot.



Obr. 1.7: Ultrazvukové čidlo - ukázka výstupu

- **Theremin s infračerveným čidlem**

Infračervená čidlo oproti ultrazvukovému měří kontinuálně, má lepší rozlišení a minimální vzdálenost pro měření je kolem 4cm. Výstupem infračerveného čidla je hladina napětí, která je závislá na množství světla dopadajícího na fototranzistor, což odpovídá vzdálenosti čidla od objektu. Jeho nevýhodou je nelineární charakteristika a tvar křivky při měření blízkých vzdáleností, tj vzdálenosti pod 4cm (viz Obr. 1.8).



Obr. 1.8: Infračervené čidlo - závislost výstupu na vzdálenosti (převzato z: <https://www.sparkfun.com/products/242>)

## 2. Návrh a konstrukce thereminu

### 2.1 Návrh Thereminu

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, obecně lze Theremin rozložit na čtyři části:

1. variabilní a referenční oscilátor pro ovládání tónu
2. směšovač
3. oscilátor a obvod antény pro ovládání hlasitosti
4. napětím řízený zesilovač.

Tyto jednotlivé části je možno realizovat různým způsobem. V této kapitole bude rozveden návrh konkrétní varianty thereminu a podrobně popsány jednotlivé části z hlediska zapojení a jejich funkce v obvodu. Jednotlivé kapitoly jsou doplněny o schemata zapojení výše zmíněných částí.

V návrhu vycházím ze zapojení EM thereminu od Roberta Mooga [5], který byl zveřejněn v časopise *Electronic Musician* v roce 1996 a z Etherwave thereminu [6], což je novější verze výše zmíněného EM thereminu. Tato verze byla vybrána kvůli dostupným schémátům a velké uživatelské základně, která sdílí svoje poznatky o stavbě a úpravě těchto nástrojů.

#### 2.1.1 Řízení výšky tónu

První částí je záznejový oscilátor (beat frequency oscillator – BFO), který slouží pro generování tónu. Záznejový oscilátor je složen ze dvou oscilátorů, referenčního, který kmitá na pevně laděné frekvenci a variabilního, jehož frekvence je proměnná (viz kap. 1.1). Signál těchto dvou oscilátorů je smíchán ve směšovači (viz kap. 2.1.2), jehož výstupem je rozdílová frekvence těchto dvou oscilátorů.

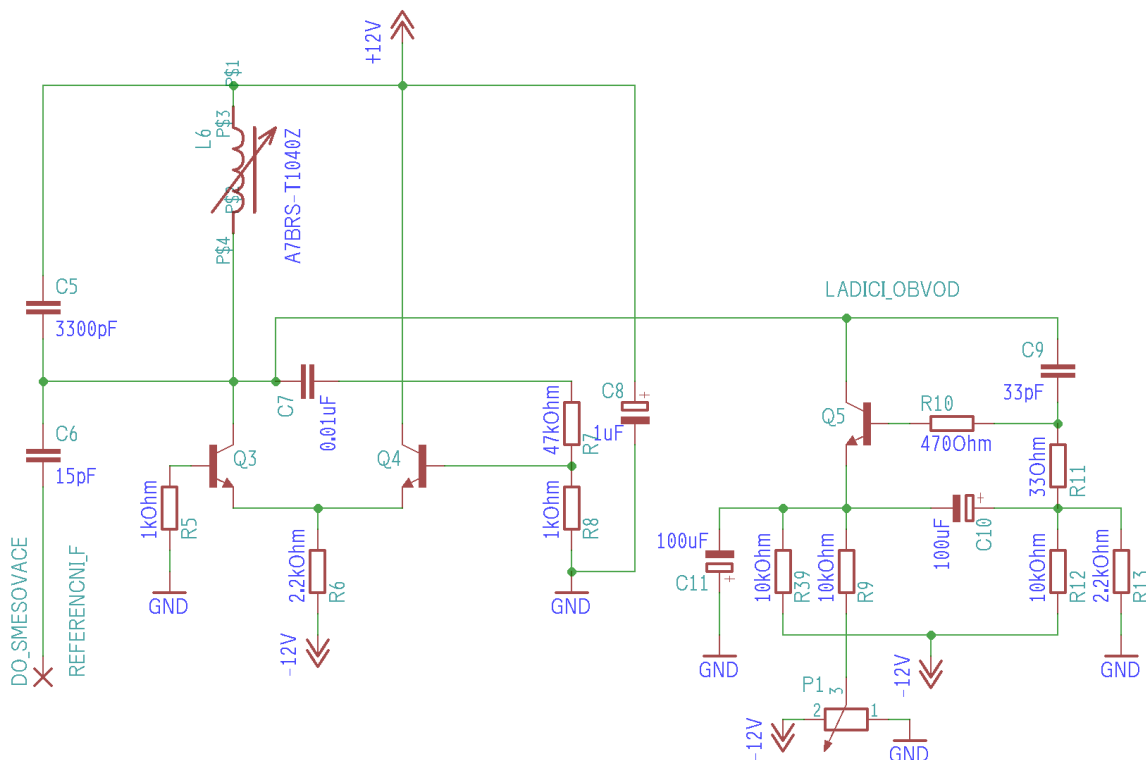
Oscilátory v EM thereminu využívají tranzistorový pár zapojených jako diferenciální zesilovač, kde báze jsou zapojeny jako diferenciální vstupy a kolektory jako výstupy, zpětná vazba je přivedena společným emitorovým odporem. Ve vedení proudu se tranzistory střídají, nejprve tranzistor označený ve schématu (viz. níže) jako Q1 (pro variabilní oscilátor, resp Q3 pro referenční oscilátor), který je bází připojen k zemi přes odpor R1 (R5) a emitorem k -12V

přes odpor R2 (R6), vede proud přes rezonanční obvod C1, L5 (C5, L6), což způsobuje pokles napětí na kolektoru tranzistoru Q1. Díky energii akumulované v rezonančním obvodu, ale pokračuje tranzistor Q1 ve vedení proudu. Napětí na jeho kolektoru opět narůstá až otevře přes C3, R3 a R4 (C7, R7 a R8) bázi tranzistoru Q2 (Q4), který začne odebírat proud přes rezistor R2 a tím způsobí vypnutí tranzistoru Q1. Poté co dojde k nabití rezonančního obvodu poklesne napětí na bázi Q2 a vedení opět převezme tranzistor Q1. Frekvence oscilátoru je dána rezonanční frekvencí LC rezonančního obvodu ( Thomsonův vztah (1)), který je zapojen ke kolektorům tranzistorů. S kondenzátorem o kapacitě 3300pF a cívkou o indukčnosti 100μH bude podle vztahu (1) rezonanční frekvence

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{3300 \cdot 100 \cdot 10^{-18}}} = 277 \text{ kHz} .$$

Samotné oscilátory, které tvoří záznejový oscilátor,

jsou identické co se použitých součástek, jejich hodnot týká a tím pádem i rezonanční frekvence. Rozdíl mezi oscilátory je pak dán jejich přídatnými obvody tj. obvodem pro doladění referenčního oscilátoru a hlavně obvodem antény u oscilátoru s proměnnou frekvencí.



Obr. 2.1: Schema zapojení referenčního oscilátoru

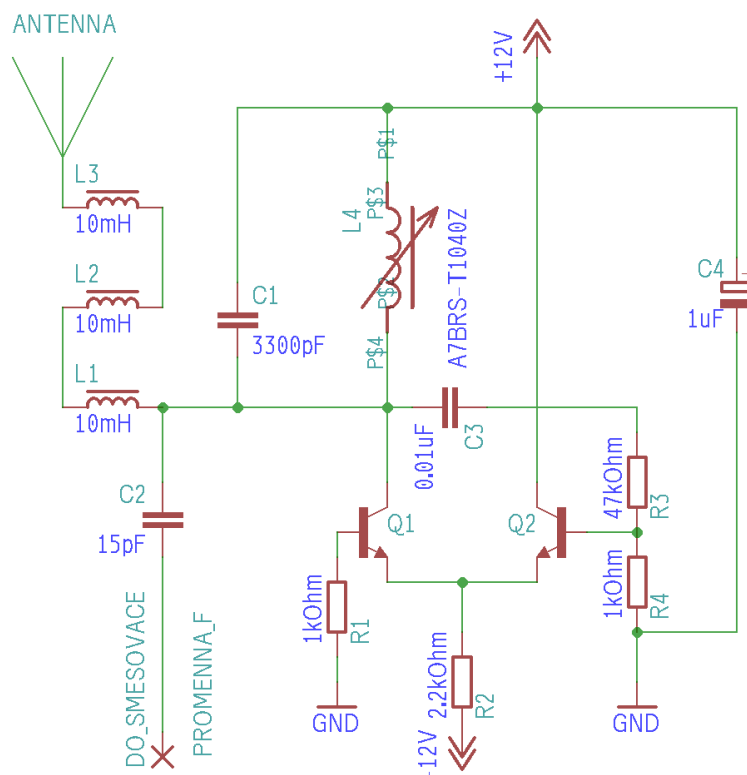


### Referenční oscilátor

Na obrázku (Obr. 2.1) je schéma referenčního oscilátoru, který kmitá na pevně laděné frekvenci a vytváří tak referenci, která se odečítá od frekvence variabilního oscilátoru. Oscilátor samotný je tvořen tranzistorem označenými jako Q3 a Q4, rezonančním obvodem a rezistorů pro nastavení pracovního bodu. Obvod připojený k oscilátoru tvořený rezistorovou sítí zapojenou kolem tranzistoru, který je označen jako Q5, a kondenzátoru C9, slouží k jemnému doladění frekvence referenčního oscilátoru. Z pohledu referenčního oscilátoru se tento obvod pro jemné doladění rezonanční frekvence jeví jako kapacita vůči zemi, připojená paralelně k rezonančnímu obvodu. Nastavováním potenciometru P1 se mění emitorový proud odebíraný tranzistorem Q5 a tím jeho zesílení. Přímo úměrně se změnou zesílení obvodu se mění i Millerova kapacita, kondenzátoru podobné chování přechodu báze - kolektor s kapacitou odpovídající základní kapacitě přechodu báze - kolektor vynásobeného činitelem zesílení. Tato kapacita se přičítá ke kapacitě kondenzátoru Q9 a společně tvoří proměnnou kapacitu přidanou do rezonančního obvodu oscilátoru. Tímto je možné ladit hudební nástroj při změně okolního prostředí bez nutnosti theremin rozebírat a přenastavovat frekvenci rezonančního obvodu, a tu buď přeladěním variabilních cívek v rezonančním obvodu nebo přímo změnou součástek.

### Variabilní oscilátor

Variabilní (nebo přeladovaný) oscilátor (viz Obr. 2.2) je, jak bylo zmíněno výše, v základě totožný s oscilátorem referenčním, ale namísto obvodu pro jemné ladění je k němu připojen obvod antény. Obvod antény je tvořen třemi cívkami L1 až L3, každá s indukčností 10mH a o celkové indukčnosti 30mH a anténou. Tři cívky o indukčnosti 10mH místo jedné s indukčností 30mH jsou použity kvůli minimalizaci vlivu vlastních kapacit cívek, protože zapojováním kapacit do série se celková kapacita snižuje. Ze stejného důvodu jsou použité cívky, které mají vinutí rozdělené do několika sekcí. Z výše uvedeného vyplývá, že hlavním požadavkem na cívky v anténních obvodech (ovládání tónu a hlasitosti) je vysoká hodnota vlastní rezonanční frekvence (SRF), v řádu jednotek MHz a Q faktor, respektive co nejnížší stejnosměrný odpor. Další součástí obvodu antény je anténa samotná, ta představuje kapacitu o velikosti přibližně 9 ~ 15pF vůči zemi, která je zapojená do série s cívkami. Konstrukčně je



Obr. 2.2: Schéma zapojení variabilního oscilátoru

anténa velmi jednoduchá, jde o zcela obyčejnou trubku nejlépe z mědi, kvůli své vysoké vodivosti, ale stačí i hliník, důležité je určit rozměry antény tak aby měla odpovídající kapacitu. Kapacita antény je součtem vlastní kapacity antény, která závisí na průměru a délce antény (v případě že se jedná o tyčovou anténu) (2), a kapacitním přírůstkem odpovídající vzdálenosti ruky hráče od antény thereminu (3).

Cívky a anténa společně tvoří sériový rezonanční obvod, který je laděný na frekvenci o něco málo nižší než je frekvence variabilního oscilátoru. Dosazováním do vztahu (1), při požadované frekvenci méně než 277kHz, vychází kapacita antény 11pF. To je podle vztahu (2) tyčová anténa o průměru 15mm a délce 90cm nebo o průměru 20 mm a délce 80cm (Tab. 1). Aby bylo možné použít anténu menších rozměrů, je možné doladit kapacitu antény přidáním vhodného kondenzátoru vůči zemi paralelně k anténě (v originálním thereminu Etherwave od Moog music Inc. je tato přídavná kapacita řešena tuhým drátem nataženým nad uzemněnou hliníkovou fólií, který se ohýbáním dá přiblížit nebo oddálit od uzemněné fólie a tím měnit přidanou kapacitu vůči zemi). Připojením obvodu antény, sériového rezonančního

obvodu, do obvodu oscilátoru, paralelního rezonančního obvodu, dojde k zatížení LC obvodu oscilátoru, které posune rezonanční frekvenci oscilátoru směrem nahoru. Pokud jsou anténa i oscilátor správně nastaveny, zvýše se rezonanční frekvence oscilátoru po připojení antény přibližně o 3kHz. Obvod antény bude takto zvyšovat frekvenci oscilátoru pokud je hráčova ruka ve velké vzdálenosti od antény. Přibližováním ruky k anténě poroste její kapacita a díky tomu bude klesat rezonanční frekvence anténního obvodu. Při poklesu rezonanční frekvence anténního obvodu poroste rozdíl mezi rezonanční frekvencí obvodu antény a rezonanční frekvencí LC obvodu oscilátoru, tím pádem se sníží zátěž rezonančního obvodu a jeho frekvence se začne vracet k původní hodnotě dané prvky LC obvodu.

Kapacita antény [pF]		Délka antény [cm]						
		40	50	60	70	80	90	100
průměr [cm]	1	5,59	6,61	7,60	8,57	9,52	10,44	11,35
	1,5	6,22	7,32	8,38	9,41	10,42	11,41	12,38
	2	6,76	7,92	9,03	10,11	11,17	12,21	13,22
	2,54	7,29	8,49	9,66	10,78	11,88	12,96	14,02
	3	7,71	8,95	10,14	11,31	12,44	13,55	14,63

Tab. 1: Kapacita antény v závislosti na délce a průměru

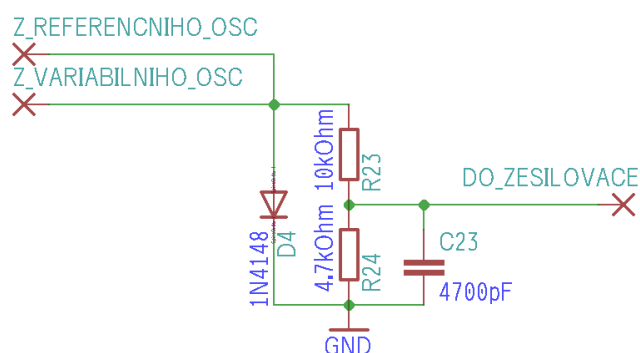
### Vazba oscilátorů

Jednotlivé oscilátory páru, které dohromady tvoří záznějový oscilátor, musí být fyzicky oddělen buď stíněním nebo vzdálenost, aby se vzájemně nevtahovaly do synchronizace. Před vstupem do směšovače jsou tyto oscilátory propojeny kapacitní vazbou přes kondenzátory C2 a C6. Toto propojení má za následek vzájemnou synchronizaci oscilátorů při nízkých rozdílových frekvencích. Přestože vtahování do synchronizace je pro práci záznějového oscilátoru negativní jev, synchronizace při nízkých rozdílových frekvencích způsobuje, že theremin nehučí, respektive nezačíná hrát, v případě že se někdo přiblíží do okolí antény nebo hráč odtáhne ruku od antény. Tedy synchronizace při nízkých rozdílových frekvencích poskytuje stabilní nulový tón. Na druhou stranu, jsou takto ale oříznuty basové tóny

### 2.1.2 Směšovač

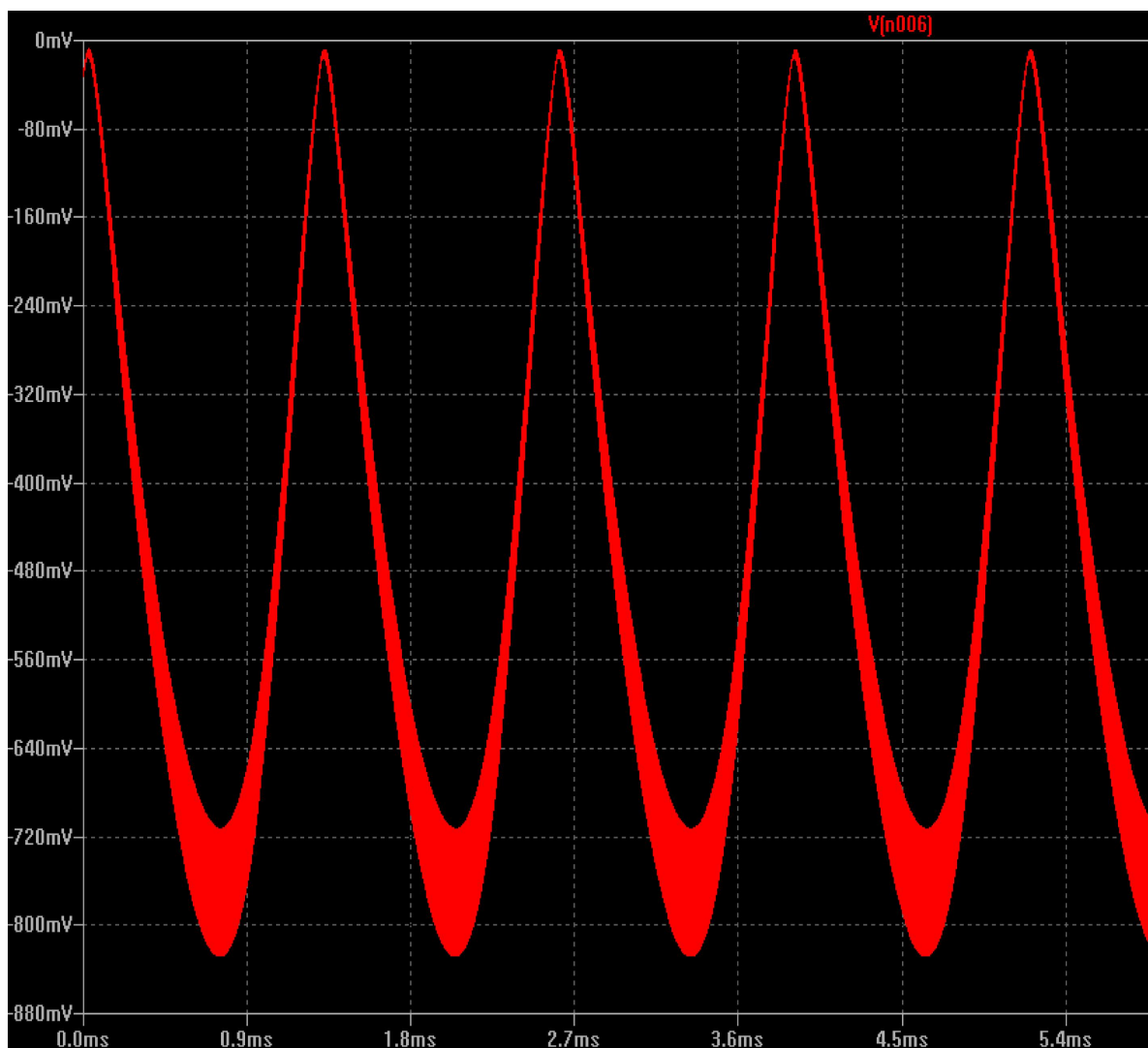
Druhou částí obvodu thereminu je směšovač, ve kterém dochází ke smíchání signálů z oscilátorů popsaných v předchozí části a k úpravě signálu pro následující zpracování

zesilovačem (kapitola 2.1.4). V obvodu thereminu je použit jednoduchý nevyvážený směšovač s diodou jako nelineárním prvkem. Na výstup směšovače je připojen filtr dolní propust', který dále propustí jen rozdílovou složku.



Obr. 2.3: Schéma zapojení směšovače

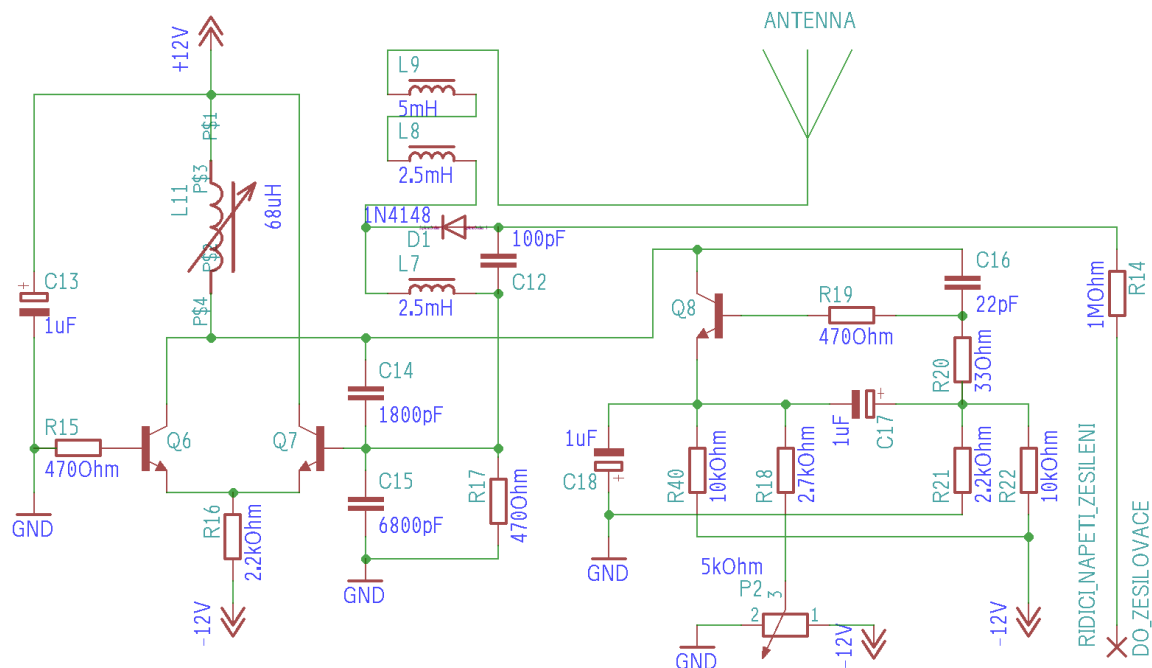
Signály z oscilátorů budou sečteny na vstupu směšovače dle vztahu pro aditivní (součtové) směšování signálu (7) (viz Obr. 1.4). Kladná část signálu, horní půlvlna obálky, bude diodou D4 svedena do země. Zůstává tak záporná část signálu která je dále zpracovávána. Ke zpracování signálu pro vstup do napěťového zesilovače slouží rezistory R23 a R24 a kondenzátor C23. Napěťový dělič R23 a R24 vytváří úbytek napětí, který je dále zesílen zesilovačem (kapitola 2.1.4). Kondenzátor C23 s odporem R23 formují filtr dolní propusti, který ze signálu odděluje součtovou složku a ponechává jen signál o rozdílové frekvenci. Tvar signálu je záporná (spodní) část obálky s namodulovanými vyššími harmonickými, které nebyly zcela odfiltrovány jen utlumeny a subharmonickými které vznikly kvůli nelinearitám součtového směšovače. Subharmonické frekvence způsobují změnu tvaru signálu, který tak není zcela čistě sinusový (Obr. 2.4). Tento signál je přiveden na neinvertující vstup první části duálního napětím řízeného zesilovače.



Obr. 2.4: Průběh signálu na výstupu směšovače

### 2.1.3 Řízení hlasitosti

Třetí částí je obvod pro řízení hlasitosti, jehož výstupem je řídicí napětí pro napětím řízený zesilovač. Obvod pro řízení hlasitosti se skládá z pevně laděného oscilátoru a obvodu antény. Anténa, stejně jako u variabilního oscilátoru pro řízení tónu, tvoří sériový rezonanční obvod. Pokud je obvod antény v rezonanci s oscilátorem protéká anténou do země rezonanční proud, úbytek napětí vyvolaný tímto proudem je zesílen a přiveden na vstup pro řízení zesílení napětím řízeného zesilovače.



Obr. 2.5: Schéma obvodu pro řízení hlasitosti

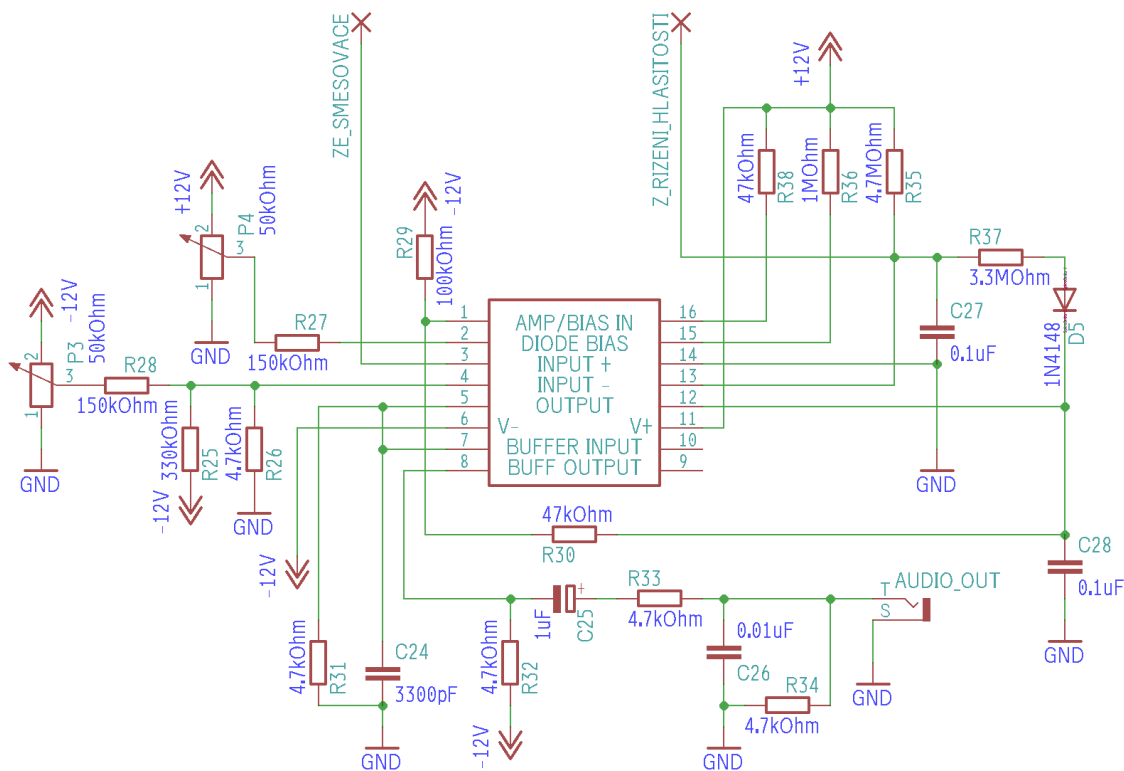
Obvod oscilátoru je vystavěn kolem tranzistorů Q6 a Q7, a pracuje na stejném principu jako oscilátory pro generování tónu (kap. 2.1.1). Rezonanční frekvence je určena rezonančním obvodem L11 a C14, podle vztahu (1) je rezonanční frekvence obvodu  $f_0 \approx 456 \text{ kHz}$ . Součástí oscilátoru je obvod pro jemné doladování frekvence fungující na stejném principu jako ladící obvod u referenčního oscilátoru pro generování tónu (kap. 2.1.1). Potenciometr P2 mění proud tekoucí emitorem tranzistoru Q8 a tím Milerovu kapacitu přechodu báze – kolektor, výsledná kapacita je pak součtem Milerovy kapacity tranzistoru Q8 a kondenzátoru C16.

Další částí obvodu pro řízení hlasitosti je obvod antény, tvořený anténou a třemi cívkami L7 až L8 o indukčnostech 2,5mH, 2,5mH a 5mH, tj. 10mH celkem. Anténa a cívky sériový rezonanční obvod. Rezonanční frekvence obvodu antény ve volném běhu, když je ruka hráče vzdálena od antény, je stejná jako rezonanční frekvence oscilátoru. Pokud je rezonanční frekvence antény a oscilátoru stejná, tj. obvody jsou v rezonanci, protéká anténou rezonanční proud. Se změnou kapacity antény se mění i proud protékající anténou. To znamená, jak se ruka hráče přibližuje k anténě, její kapacita se zvyšuje a tak klesá rezonanční frekvence obvodu antény. S poklesem rezonanční frekvence klesá rezonanční proud. Tento proud vytváří

na kondenzátoru C12 úbytek napětí, jsou-li anténa a oscilátor v rezonanci, pak je na uzlu kondenzátoru C12, diody D1 a rezistoru R14 měřitelné napětí  $-4V$ . Jak hráč přibližuje ruku k anténě, roste kapacita a klesá rezonanční proud protékající anténou, toto napětí klesá k nule. Rezistor R14 a kondenzátor C27, který je zakreslen ve schématu obvodu zesilovače (Obr. 2.6), tvoří filtr dolní propust' který upravuje napětí na stejnosměrné před vstupem do zesilovače. Toto napětí je přivedeno na invertující vstup druhé části duálního operačního zesilovače.

### 2.1.4 Zesílení signálu a výstup

Poslední částí thereminu je obvod pro zesílení signálu a výstupní obvod. Zesilovaným signálem je výstup ze směšovače (kap. 2.1.2), pro řízení velikosti zesílení signálu ze směšovače slouží napětí z obvodu pro kontrolu hlasitosti (kap. 2.1.3). Zesílený signál na výstupu zesilovače je následně pomocí kondenzátorů zbaven vyšších harmonických a impedančně přizpůsoben pro výstupní úroveň.



Obr. 2.6: Schéma zapojení napětím řízeného zesilovače

Zesílení signálu obstarává duální operační audio zesilovač LM13700, který je nastaven přílehlou odporovou sítí (*Obr. 2.6*). Tento operační zesilovač se skládá ze dvou nezávislých operačních zesilovačů se společným napájením. První část, piny 1 až 8, zesiluje signál ze směšovače. Druhá část, piny 9 až 16, zesiluje a převádí na proud signál z obvodu pro řízení hlasitosti, který je přiváděn do první části obvodu LM13700, kde řídí zesílení. Každá část OZ je kromě invertujícího (piny 4 a 13) i neinvertujícího (piny 3 a 14) vstupu vybavena vstupem pro nastavení zesílení (piny 1 a 16) a pomocným vstupem pro linearizaci převodní funkce (piny 2 a 15), protože s rostoucím rozdílovým napětím na vstupech OZ (3 a 4 nebo 13 a 14) se převodní funkce stává výrazně nelineární. Výstup zesilovače je připojen k pinům 5 a 12. Piny 7 a 8 (10 a 9) jsou vstupem a výstupem pro proudové proudového posílení signálu. Proudové posílení je zajištěno dvojicí Darlingtonových párů, kde pin 7 (10) je vstupem připojeným na bázi tranzistoru a pin 8 (9) je připojen k emitoru a slouží jako výstup proudového posilovače.

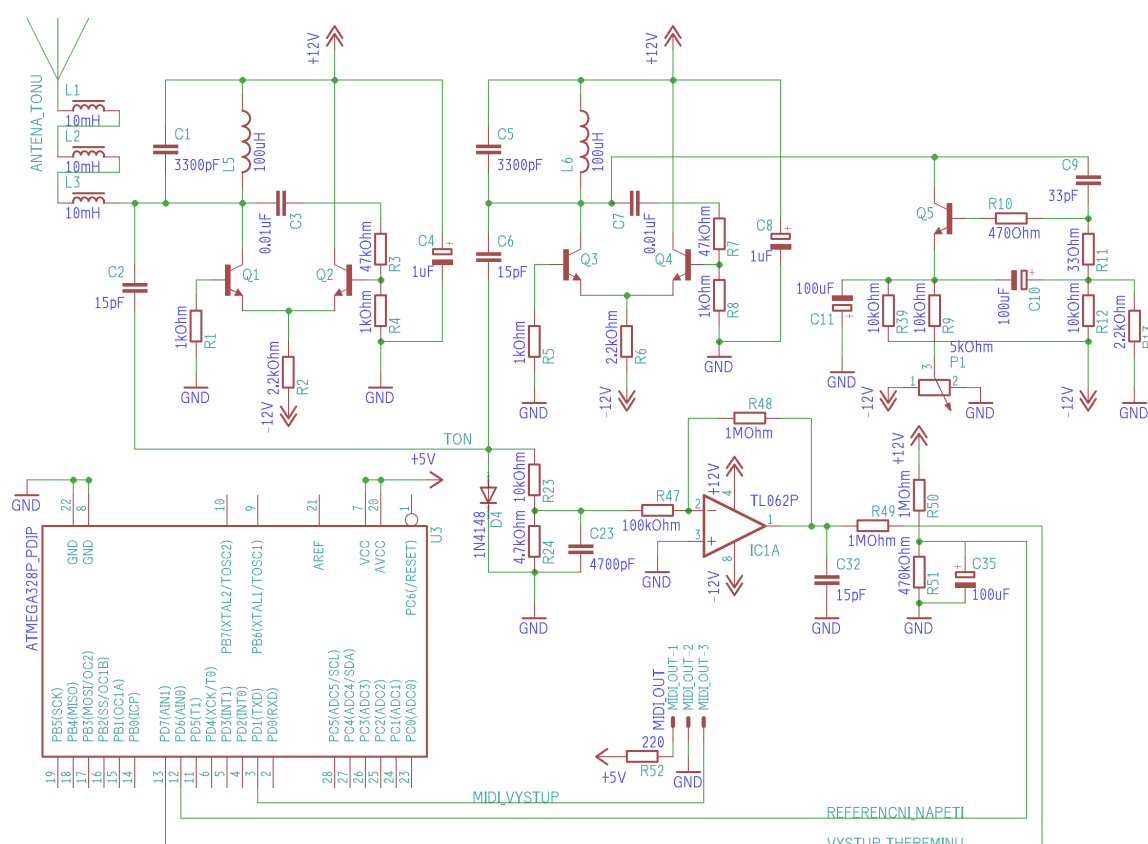
Napětí z obvodu pro řízení hlasitosti v rozsahu 0 až -4V (*kap. 2.1.3*) je připojeno na invertující vstup druhé části, pin 13, která převádí napětí z obvodu pro řízení hlasitosti na proud pro řízení zesílení první části. Diody D5 a odpor R37 tvoří zpětnou vazbu, která upravuje průběh výstupní charakteristiky na logaritmický průběh. Na výstupu druhé části, pin 12, je napětí v rozsahu -12V, když je ruka hráče v těsné blízkosti antény pro ovládání hlasitosti, až 12V, ruka hráče se nachází daleko od antény. Napětí -12V na výstupu druhé části zesilovače pak znamená že zvuk bude maximálně ztlumený a napětí 12V znamená maximální zesílení. Toto napětí z výstupu druhé části vytváří na odporu R38 tok proudu, který je přiveden na pin 1, vstup pro řízení zesílení první části, která zesiluje signál ze směšovače. Signál ze směšovače je přiveden na neinvertující vstup první části, pin 3, a zesílen je jeho rozdíl vůči napětí na pinu 4. Napětí přiložené na pin 4, invertující vstup, je možno měnit pomocí potenciometru P4 a čímž se mění jak moc bude signál na vstupu oříznut shora. Proud přivedený na pin 2 slouží k nastavení linearizačních diod, velikost tohoto proudu, přivedeného na pin 2, je možno měnit pomocí potenciometru P4 a tím měnit upravovat šířku vlny. Změna šířky vlny odpovídá změně tónu zvuku. Aby bylo možné zvukový výstup thereminu zatížit, je zesílený audio signál, pin 5, ještě připojen na proudový posilovač, piny 7 a 8. Audio výstup je tedy připojen k pinu 8 zesilovače, výstup z proudového posilovače. Z audio signálu je



nejprve rezistorem R32 a kondenzátorem C25 odstraněna stejnosměrná složka a poté rezistorem R33 a kondenzátorem C26 odfiltrovány vyšší harmonické složky. Nakonec je zesílený, upravený a odfiltrováný signál přiveden na audio výstup thereminu, typicky zástrčka pro 1/4" audio jack. Rezistor R34 slouží k impedančnímu přizpůsobení výstupu. V tomto schématu zapojený rezistor o odporu  $4700\Omega$  přizpůsobuje výstup na linkovou úroveň.

## 2.2 Prototyp pro realizaci MIDI komunikace

Po konzultaci bylo rozhodnuto vytvořit prototyp thereminu pro testování MIDI komunikace. Hlavním problémem, který je třeba vyřešit pro převod výstupu thereminu do MIDI, je zachování efektu glissanda při převodu plynule se měnící frekvence výstupu thereminu do MIDI formátu. Jelikož je z hlediska tématu práce důležitý převod frekvence, bude při konstrukci prototypu řešen přednostně obvod pro generování tónu, tedy záznějový oscilátor a směšovač. Dále bude součástí obvodu jednoduchý zesilovač který zajistí dostatečnou úroveň signálu pro hardware MIDI kontroléru (Obr. 2.7). Převod frekvence,



Obr. 2.7: Schéma zapojení prototypu

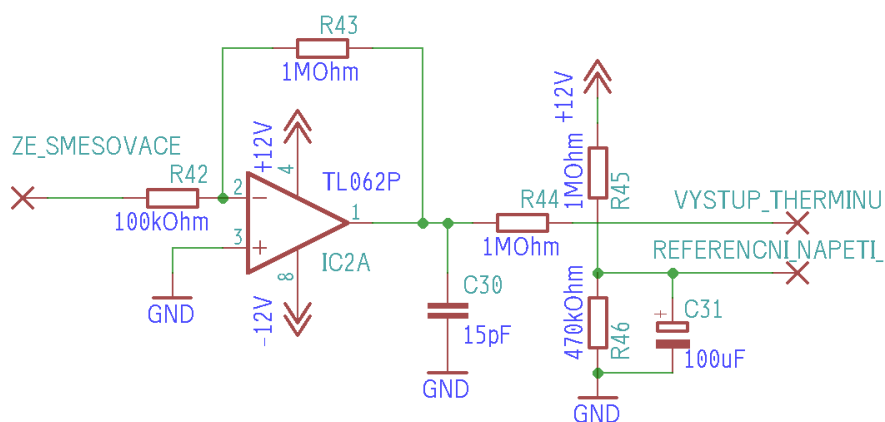
generované prototypem thereminu, do MIDI zprávy bude rozveden v následující, třetí, kapitole (kap. 3).

### 2.2.1 Řízení výšky tónu a směšovač

Obvody pro generování tónu a řízení jeho výšky je téměř stejný jako u původního návrhu, včetně obvodu pro doladování frekvence referenčního oscilátoru. Jediným rozdílem oproti původnímu návrhu jsou cívky L5 a L6 (Obr. 2.7), které nejsou variabilní, ale s pevnou hodnotou. Přeladování obvodu je tak možné pouze změnou součástek, např. přidáním kapacity paralelně do rezonančního obvodu nebo odmotáním závitu z cívek, referenční oscilátor je možné ladit pomocí ladícího obvodu, potenciometr P1.

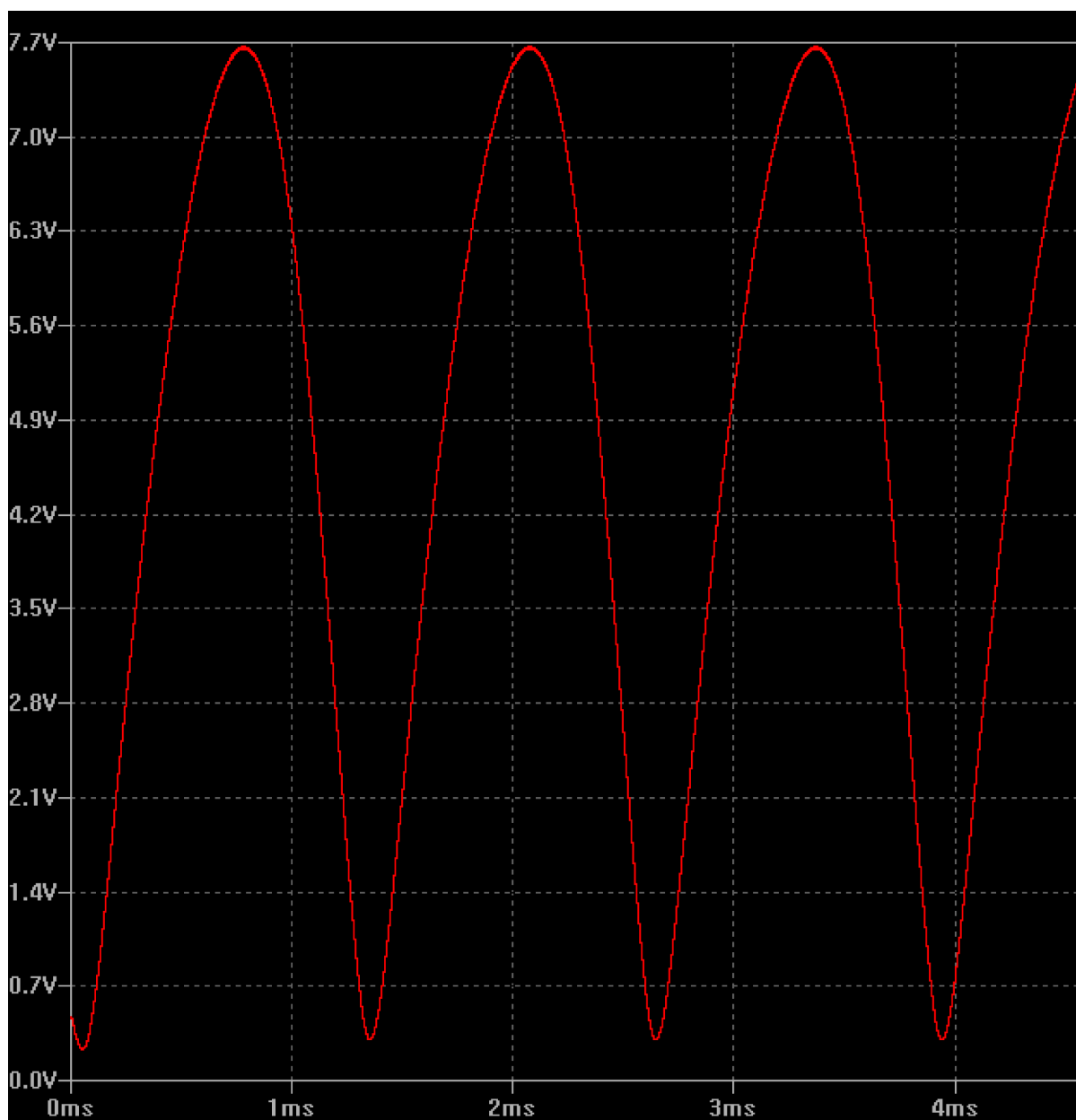
### 2.2.2 Zesílení signálu a výstup

Na výstupu ze směšovače je úroveň signálu 0 až -800mV, před vstupem do frekvenčního čítače nebo jiného zařízení pro měření frekvence je třeba signál zesílit a posunout nad nulovou osu. K tomu účelu je do obvodu prototypu zapojen operační zesilovač jako



Obr. 2.8: Schéma výstupního obvodu prototypu

invertující zesilovač (Obr. 2.8). Invertováním signálu, je signál převrácen nad nulovou osu a poté zesílen na požadovanou úroveň, průběh signálu vypadá stejně jako průběh na výstupu ze směšovače (Obr. 2.4), jen je přetočený nad kladnou osu. Výstup ze zesilovače je pak vyhlazen filtrem, kondenzátor C30 a rezistor R44, dolní propustě s frekvencí zlomu  $f_0=4822\text{ Hz}$  (Obr. 2.9). Součástí výstupu je i odporový dělič, R45 a R46, který určuje porovnávací hladinu pro komparátor. Kondenzátor C31 zbavuje referenci nežádoucích vyšších harmonických.



Obr. 2.9: Průběh signálu na výstupu prototypu

### 3. Využití thereminu jako MIDI kontroléru

Poslední částí předkládané diplomové práce se zabývá prozkoumáním možnosti řešení výstupu thereminu pomocí rozhraní MIDI. Myšlenkou této části práce je, že údaje o výšce tónu a jeho hlasitosti, respektive frekvenci výstupního signálu a jeho amplitudě, budou převáděny do podoby MIDI dat a odesílány do dalších zařízení, např. syntezátoru. Syntezátor, může být buď klasicky hardware, tedy fyzický kus vybavení, nebo softwarový, tedy program běžící v PC a plnící funkci klasického syntezátoru. Ve finále by měl takto upravený theremin, s výstupem ve formátu MIDI dat, řídit zvuk hraný syntezátorem.

V první fázi příprav pro zprovoznění MIDI výstupu thereminu, je třeba zjistit jakým způsobem probíhá MIDI komunikace, např. jak jsou do MIDI formátu kódovány údaje o frekvenci, tónu, a amplitudě, hlasitosti. Dále je třeba promyslet jak tyto údaje o výstupu thereminu vůbec získat, to znamená určit jak bude měřena frekvence a amplituda signálu. Třetím krokem je na základě znalostí o MIDI protokolu získaném v prvním kroku příprav určit jak budou naměřená data zpracována a odeslána .

#### 3.1 MIDI protokol

Zkratka MIDI znamená Musical Instruments Digital Interface, digitální rozhraní hudebních nástrojů. MIDI začalo vznikat na začátku 80. let 20. století, jako koncept univerzálního rozhraní hudebních nástrojů. Tuto myšlenku podpořilo několik velkých amerických a japonských firem vyrábějících elektronické hudební nástroje a v roce 1983 byla vydána první MIDI norma verze 1.0. O dva roky později, v roce 1985, vyšla podrobná verze MIDI normy a byly ustanoveny normativní orgány odpovědné za dodržování MIDI normy a její další vývoj.[8].

MIDI je sériový jednosměrný komunikační protokol, který umožňuje propojení syntezátorů, samplerů, počítače a další audiotechniky. Hardware MIDI rozhraní je tvořen mikroprocesorem pro zpracování dat a konektorem typu DIN. Typy konektorů jsou výstupní OUT, vstupní IN a průchozí THRU. Jednosměrnost v tomto případě znamená že na jednom kabelu je možné pouze spojení IN → OUT nebo OUT → IN, případně s vložením průchozího THRU do řetězce. Softwarové vybavení MIDI rozhraní je tvořeno dohodnutým

komunikačním jazykem a pokyny k interpretaci MIDI dat. Komunikační jazyk a pokyny k interpretaci jsou zapsány v operačním systému zařízení. Samotná komunikace pomocí MIDI protokolu probíhá rychlostí 31250 Baudů pomocí vícebytových zpráv, zpravidla tříbytových. První byte je stavový byte, který příjemci komunikace říká jakým způsobem mají být interpretovány, respektive jaká data obsahují, následující datové byty (např. údaje o stisklé klávese, nastavení registrů). Stavové bity mají ve svém prvním bitu vždy logickou 1, takže jejich hodnota je 128 až 255, datové byty mají ve svém prvním bitu zapsanou logickou 0, takže nabývají hodnot od 0 do 127. Kromě typu zprávy obsahuje stavový byte číslo kanálu, pro který jsou určena data. Existuje sedm různých stavových bytů pro řízení kanálu (*channel controll - cc*) 0x8k až 0xEk, kde *k* je číslo kanálu (0 až 15 v hexadecimální soustavě), a jeden stavový byte 0xFn, kde *n* je různé číslo od 0 do 15, určený pro systémová data a data reálného času.

Pro odeslání informací o tónu slouží stavový byte 0x9k, *Nota zapnuta*, ten je následován dvěma datovými byty. První byte je číslo noty, který určuje jaká nota bude hrána (*Tab. 2.*),

Tón	c'	c#'	d'	d#'	e'	f'
Číslo tónu	60	61	62	63	64	65
Tón	f#'	g'	g#'	a'	a#'	h'
Číslo tónu	66	67	68	69	70	71

Tab. 2: Čísla tónu

a druhý je hlasitost v hodnotách 0 až 127. Zapnutá nota zůstává zapnuta do chvíle než je vypnuta další zprávou. Pro vypnutí daná noty je stavový byte 0x8k, *Nota vypnuta*, nebo lze k vypnutí odeslat znovu *Nota zapnuta*, ale s nulovou hlasitostí. Protože ale theremin mění výšku tónu plynule, je třeba plynule také měnit tón hraný syntezátorem. K plynulé změně je stavový byt 0xEk *Ohýbání tónu*, následují nejméně významný byte hodnoty (LSB) a nejvíce významný byte hodnoty (MSB). Dohromady tak je rozlišení *ohýbání tónu* 16384 hodnot na zvolený rozsah. V praxi se ale využívá pro zasílání informací o ohybu tónu pouze hodnota MSB, tedy rozlišení 128 hodnot na rozsah. Rozsah pro funkci *ohýbání tónu* je běžně +/-2 půltóny, ale u většiny zařízení je možné tento rozsah změnit např. na +/-12 půltónů, maximální rozsah se liší napříč nástroji. [8]

### 3.2 Měření výstupu thereminu

Před vlastním převodem je třeba výstup thereminu nejprve změřit a zjistit frekvenci a amplitudu signálu. Hlasitost lze zjišťovat měřením napětí na výstupu obvodu pro řízení hlasitosti (0 až -4V), který je přiložen k pinu 13 zesilovače nebo na výstupu druhé části zesilovače, pin 12 (-12V až 12V). Frekvenci lze měřit buď na výstupu ze směšovače nebo zesílený a odfiltrovaný signál na výstupu řízeného zesilovače.

Aby byla zachována plynulá znění tónu i při komunikaci přes MIDI a tón skutečně odpovídal okamžité poloze ruky, je třeba frekvenci měřit co nejčastěji a co nejčastěji odesílat do syntezátoru informace o výšce tónu. Dále je třeba měřit frekvenci s dostatečnou přesností, aby jednotlivé změny od sebe nebyly rozlišitelné. Schopnost lidského ucha rozlišit jednotlivé frekvence je frekvenčně závislá a minimální rozlišitelný rozdíl ve frekvenci stoupá spolu s frekvencí, nejprve lineárně a zhruba od 800Hz stoupá hodnota rozpoznatelného rozdílu logaritmicky. Udávané hodnoty odpovídají rozlišní změny tónu o přibližně 5 až 6 centů (1 cent je 1/100 půltónu). Změna o 5 centů odpovídá změně o 0,4Hz, což je o 22 $\mu$ s v délce periody signálu, u dolní meze rozsahu thereminu, a o 8Hz, což je 1 $\mu$ s v délce periody, u horní meze rozsahu. Protože se měřené frekvence budou pohybovat v rozsahu od přibližně 100Hz do 3kHz, bude přímé měření frekvence, počítání kmitů za známé časové období a následně vydělení počtu kmitů délkou období, nevhodné z hlediska časové náročnosti pro dosažení požadované přesnosti. Frekvence bude měřena tak, že se změří doba trvání jedné periody signálu a frekvence se vypočítá z tohoto údaje. Takovéto měření frekvence bude provedeno digitálním čítačem, který bude čítat po dobu trvání jedné periody, frekvence bude získána vydělením taktu čítače počtem načtených hodinových kmitů.

Délka periody v dolní mezi rozsahu bude určující při požadavku na bitovou hloubku čítače, čím větší bude frekvence čítače, rychlost čítání, tím více bitů bude třeba na to, aby obsáhli délku periody. Časový rozdíl při změnách frekvence o pět centů u horní meze rozsahu bude určující při požadavku na rychlost čítače, čím rychlejší bude čítač tím větší přesnosti lze při měření periody dosáhnout. S rychlostí čítače poroste nárok na bitovou hloubku, počet bitů

$$b = \log_2\left(\frac{f_{CLK}}{f_s}\right) \quad (8)$$

za periodu bude odpovídat vztahu (8) zaokrouhleno nahoru. V tabulce (*Tab. 3*) níže se nachází

přepočítání frekvencí čítače na bitovou hloubku pro měření kmitočtu 100Hz, přesnost čítače je převrácená hodnota jeho frekvence (+/- jeden kmit čítače). Z tabulky (Tab. 3) lze vyvodit, že

Bitová hloubka čítače pro 100Hz; T = 10ms				
Frekvence čítače [Hz]	1000000	4000000	8000000	16000000
Přesnost čítače [ns]	1000	250	125	62,5
Bitová hloubka	13,28771238	15,28771238	16,28771238	17,28771238

Tab. 3: Bitová hloubka a přesnost čítače

pro bitovou hloubku čítače 16 bitů bude z hlediska přesnosti postačovat čítač s frekvencí 1MHz, ale přesnost bude na hraně požadavku, pro větší přesnost bude lepší zvolit 2MHz nebo 4MHz čítač. Pro větší kmitočty už je potřeba více než 16 bitů, to znamená buď více než 16-ti bitový čítač nebo ukládání počtu přetečení čítače.

### 3.3 Převod výstupu thereminu do MIDI

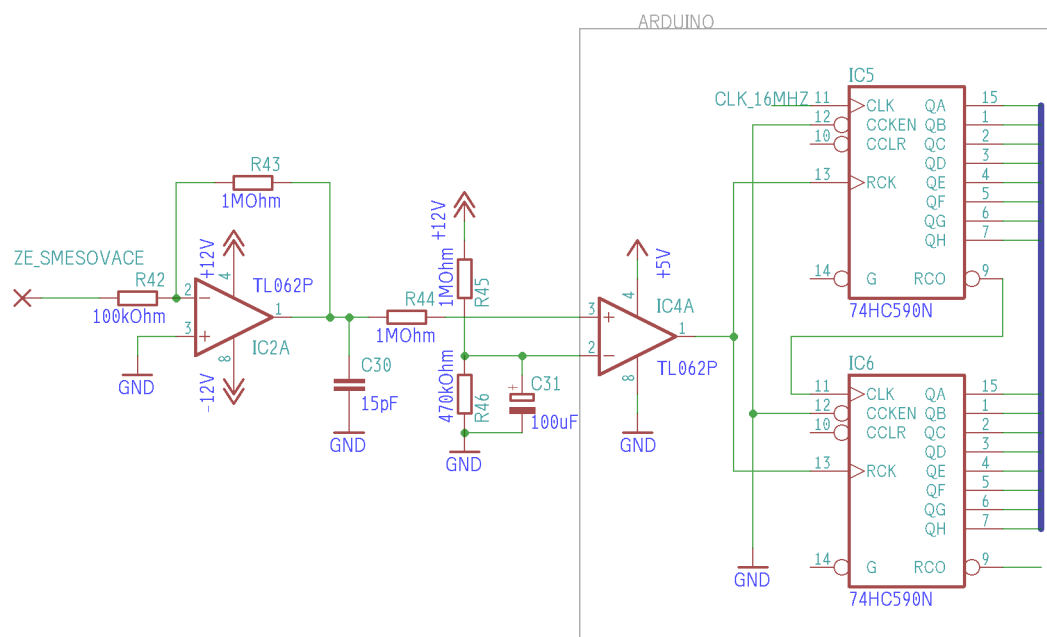
V této části třetí kapitoly popíší prostředky použité pro měření signálu, konverzi těchto informací do dat používaných MIDI normou a odeslání těchto informací do syntezátoru, ať už jde o hardwarový syntezátor nebo softwarový syntezátor v PC. Popsán bude jak použitý hardware tak jeho softwarové vybavení.

Pro testování MIDI komunikace byl vytvořen prototyp thereminu, který je popsán výše v kapitole 2.2. Tento prototyp generuje pouze proměnou frekvenci, totiž obvod pro řízení zvuku není jeho součástí. Obvod pro řízení hlasitosti není v obvodu prototypu přítomen protože měření napětí, které reprezentuje hlasitost, je technicky jednodušší než měření frekvence. Stejně tak je jednodušší v softwaru ošetřit i plynulou změnu hlasitosti. Takže vzhledem k nedostatku času bylo rozhodnuto vytvořit prototyp pouze pro generování frekvence a testovat převod frekvence do MIDI dat (kap. 2.2). Výstup prototypu (Obr. 3.1) je zesílen na  $5V_{pp}$ , odfiltrován a přiveden na vstup komparátoru, jehož porovnávací hladina, na

druhém vstupu, je určena odporovým děličem R45 a R46  $\rightarrow U_k = \frac{12 \cdot 470}{1470} = 3,84V$ .

Komparátor má za úkol vytvarovat audio signál na obdélníkové pulzy o úrovních 0V a 5V. Tyto pulzy jsou přivedeny na RCK vstup čítače, který reaguje na rostoucí hranu a na výstupní registr zapíše aktuální stav čítačů. Čítače jsou zapojeny v kaskádě, tím je dosaženo potřebné

bitové hloubky, a jsou nastaveny pro kontinuální počítání. Rostoucí hrana na výstupu od komparátoru, způsobí výpis stavů čítačů na výstupní registr. Uložením této hodnoty je každé rostoucí hraně přiřazena časová značka. Perioda signálu se pak rovná rozdílu dvou po sobě jdoucích časových značek.



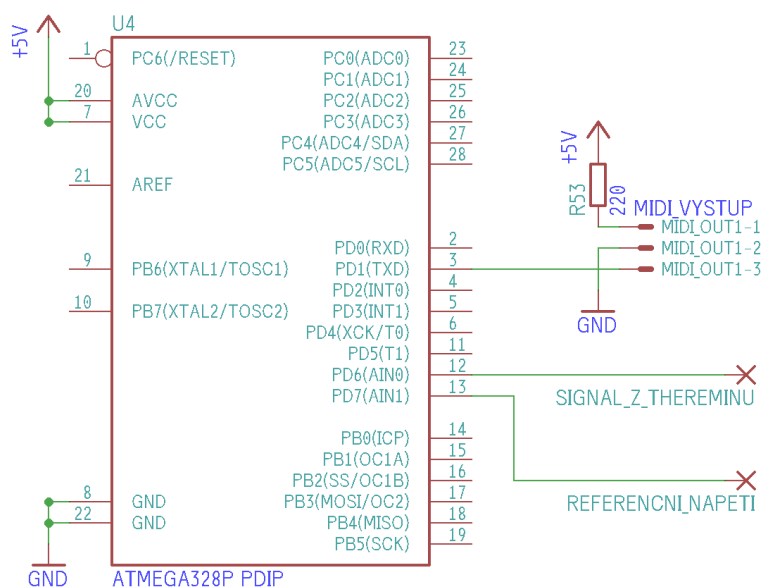
Obr. 3.1: Schéma zapojení pro měření periody

### 3.3.1 Hardware

Všechny požadované funkce, měření frekvence, zpracování naměřené hodnoty a její odeslání provede jednočipový mikropočítač. Ten musí mít frekvenci minimálně 2MHz a být vybaven 16-ti bitovým čítačem, analogovým komparátorem a sériovým portem. Pokud má mikropočítač zároveň měřit, zpracovávat naměřené hodnoty a odesílat MIDI data bude rychlejší procesor vhodnější. Rozsah vestavěného čítače lze zvýšit ukládáním počtu přetečení nebo snížením rychlosti čítače pomocí frekvenčního děliče. Dále je třeba aby byl mikropočítač vybaven dostatečnou vnitřní pamětí pro program a proměnné, protože procesor bude operovat s proměnnými typu *float*. Mikropočítače AVR řady megaAVR a vyšší typy řady tinyAVR budou pro funkci MIDI kontroléru dostatečné dostatečné. S prototypem thereminu byl jako MIDI kontrolér použit mikropočítač Atmel ATmega 328P zabudovaný ve vývojovém kitu Arduino Uno.



Na obrázku (Obr. 3.2) je zjednodušené schéma zapojení mikropočítače, zobrazeno je pouze zapojení vstupů a výstupů relevantních pro funkci MIDI kontroléru. Vstupy AIN0



Obr. 3.2: zjednodušené schéma zapojení mikropočítače

a AIN1, piny 12 a 13, jsou vstupy komparátoru. Ten porovnává signál z thereminu s referenční hladinou. Výstup komparátoru je pomocí vnitřní logiky mikropočítače přeměřován vstup ICP, pin 14, který při definované události uloží do paměti aktuální hodnotu čítače, čímž přiřadí události časovou značku. V tomto případě událost, při které se bude číst hodnota čítače, je rostoucí hrana na výstupu komparátoru. Program uložený v paměti počítače pak z hodnot přečtených na čítači vypočte frekvenci signálu. MIDI data jsou odesílána pomocí MIDI rozhraní, které je připojeno vysílacímu pinu TX, pin 3, sériového portu. MIDI konektor má zapojeny tři piny, jeden je připojen k zemi, další je připojen k napětí 5V přes odpor 220Ω, třetí pin je připojen právě k vysílací straně sériového rozhraní TX, pin 3. [9]

### 3.3.2 Software

Za měření frekvence, přepočtení hodnot na MIDI data a jejich odeslání je zodpovědný program, který je uložen v mikropočítači. Aby bylo zachováno glisando, program nevysílá proud zpráv *nota zapnuta/vypnuta*, ale pouze hodnotu *ohýbání tónu* pro tón a' (440Hz). Zpráva *nota zapnuta* je vysílána pokud se měřená frekvence ocitne ve hraném rozsahu, pokud

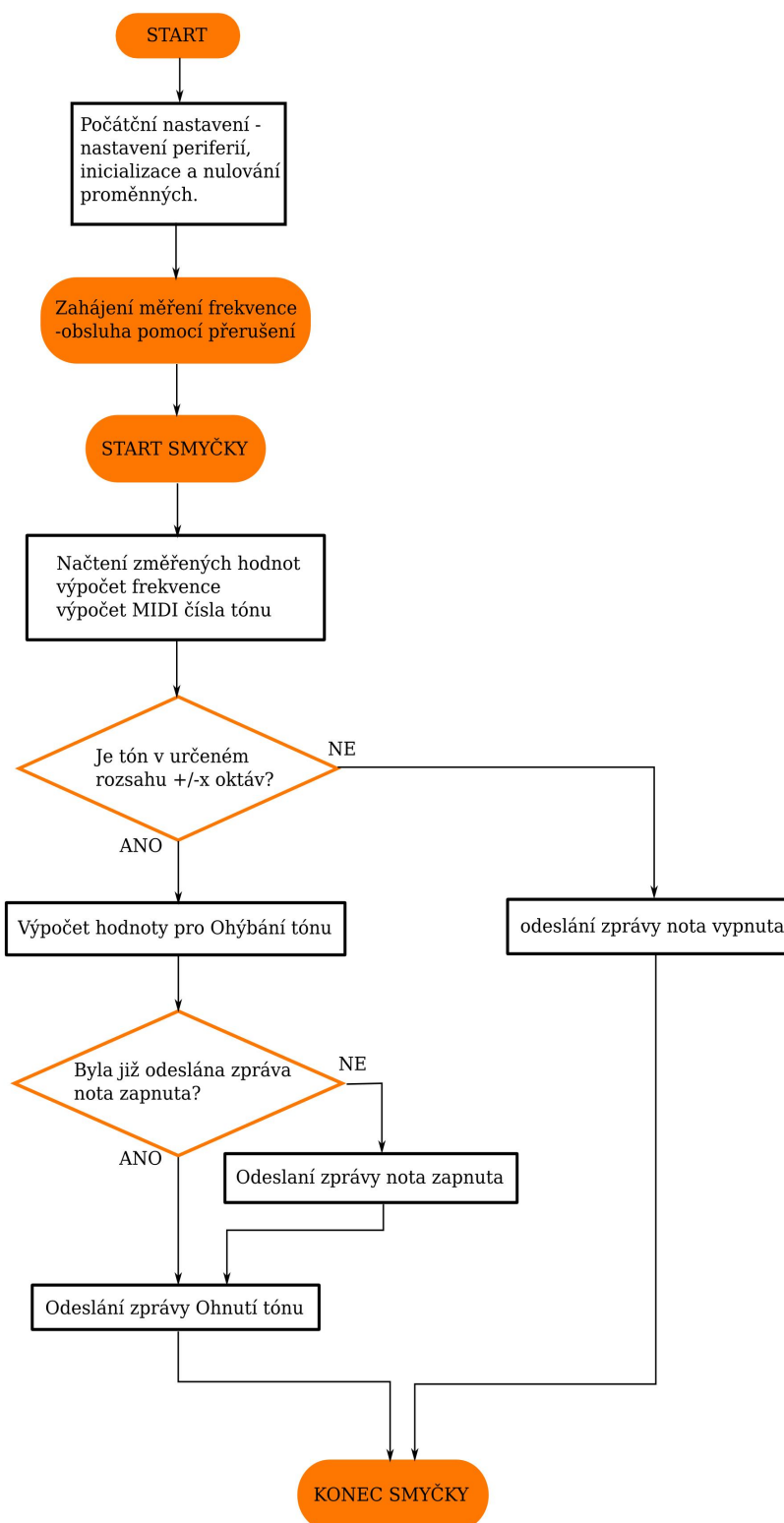
jej opustí vypne se generování tónu pomocí příkazu *nota vypnuta*. Nachází-li se měřená frekvence v hraném rozsahu je nota pouze aktualizována pomocí zpráv *ohýbání tónu*. Tímto je zajištěna plynulá změna hraného tónu, ale rozsah thereminu je teď totožný s rozsahem *ohýbání tónu* (*pitch bend*) nástroje. Na softwarových syntezátorech v PC je možné nastavit široký rozsah pro funkci *ohýbání tónu*, např +/- 3 oktávy. Softwarové syntezátory navíc podporují i MSB i LSB datový byte pro *ohyb tónu*, takže i na velkém rozsahu lze zachovat přesnost. Oproti tomu většina HW syntezátorů pracuje pouze s hodnotou MSB. Při testování v laboratořích ve škole byl theremin použit jako MIDI kontrolér pro syntezátor YAMAHA SY-99, pro který byl maximální rozsah pro *ohýbání tónu* +/- 1 oktáva a ohyb samotný byl určen pouze daty odeslanými v MSB datovém bytu. Toto mnou navržené řešení, ale umožňuje provést hru glisando z jednoho konce rozsahu na druhý. Další možností by bylo ohýbat tóny v menším rozsahu, +/-2 půltóny, a navazovat jednotlivé tóny na sebe. Při tomto způsobu, ale dochází ke slyšitelnému zapínání a vypínání not a změna tónu již není spojitá.

Po startu programu dojde k počátečnímu nastavení proměnných, inicializaci čítače a komparátoru a nakonec se spustí měření frekvence. Ve vlastní smyčce programu se nejprve přečte změřená frekvence. Z hodnoty frekvence se určí MIDI číslo noty (9, kde  $f$  je naměřená

$$Nota = 69 + 12 \cdot \left( \log_2 \left( \frac{f}{440} \right) \right) \quad (9)$$

$$Ohyb = 8192 + \left( \frac{16384}{rozsah} \right) \cdot \log_2 \left( \frac{f}{440} \right) \quad (10)$$

frekvence) a hodnota ohybu noty vztažená k notě  $a'$  (440Hz) (10, kde  $f$  je naměřená frekvence a *rozsah* je počet oktáv rozsahu). MIDI číslo noty je pak využito při testování jestli je nota v nastaveném rozsahu, pokud ano pošle program zprávu *ohýbání tónu*. Před odesláním dat pro ohyb tónu, se ještě otestuje jestli syntezátor právě hraje, pokud ne zapne se generátor tónu zprávou *nota zapnuta*. Generátor tónu je vypnut pokud bude MIDI číslo noty mimo nastavený rozsah (Obr. 3.3).



Obr. 3.3: Diagram běhu programu

Frekvence je měřena pomocí přerušení vyvolávaných detekcí rostoucí hrany na výstupu z komparátoru (Obr. 3.1, 3.2, Kap. 3.1., 3.2). Detekce rostoucí hrany spustí výpis stavu čítače do jeho výstupního registru, ICR1, a aktivuje příznak přerušení vyvolaného komparátorem. Během obsluhy přerušení se stav výstupního registru čítače uloží do proměnné, `capture_lsw = ICR1`. Pro získání hodnoty časové značky je hodnota registru ICR1 vynásobena počtem přetečení čítače. Tento počet přetečení `capture_msw`, je získán inkrementací této proměnné při obsluze přetečení čítače. Perioda signálu odpovídá rozdílu dvou po sobě jdoucích časových značek. Aktuální časová značka je uložena do proměnné určené pro předchozí měření `capture_previos = capture`, kde zůstává uložena do dalšího volání obsluhy přerušení. Takto odměřená perioda signálu je vyjádřena v počtech hodinových pulsů. Z tohoto údaje určíme frekvenci  $f = \frac{f_{CLK}}{n}$ , kde  $f_{CLK}$  je frekvence čítače a  $n$  je počet načtených kmitů.

### Obsluha přerušení

```
ISR(TIMER_CAPTURE_VECTOR) {
    uint16_t capture_lsw;
    uint32_t capture, period;
    uint8_t i;

    capture_lsw = ICR1;

    capture = ((uint32_t)capture_msw << 16) | capture_lsw;
    period = capture - capture_previous;
    capture_previous = capture;
}

ISR(TIMER_OVERFLOW_VECTOR) {
    capture_msw++;
}
```

### 3.4 Další možné funkcionality MIDI kontroléru

Takto sestavený MIDI kontrolér je možné dále rozšiřovat a modifikovat. V této podkapitole proberu několik možných budoucích rozšíření a modifikací.

- **Kolečko ohýbání tónu:** theremin lze například použít jako bezdotykový ovladač pro ohýbání tónu, kde je frekvence výstupu transformována pouze na informaci o ohybu tónu, který bude hráč hrát na syntezátor.
- **Ovladač registrů:** podobně jako výše. Frekvence výstupu nebude převedena tón ale na hodnotu v určitém rozsahu, která bude odeslána jako hodnota registru. Pohybem ruky nad anténou pro řízení tónu bude hráč vybírat který z registrů je právě řízen. Takto by šlo například přepínat zvukové banky.
- **Zobrazovací jednotka:** tento na mikropočítači postavený MIDI kontrolér lze velmi snadno doplnit o zobrazovací jednotku, např. maticový displej 16x2. Na displeji je pak možné zobrazovat údaje o frekvenci, tónu nebo hodnotách registrů.
- **Tlačítka a/nebo klávesnice:** přidání tlačítek nebo klávesnice a jejich naprogramování, umožní měnit parametry programu bez jeho přehrávání v mikropočítači, např. jaký způsobem jsou zpracovávány hodnoty frekvence a amplitudy, výběr zvukových bank. Čímž se rozšíří možnosti řízení tohoto MIDI kontroleru
- **Univerzální dvouosý bezdotykový kontrolér:** kombinací výše uvedených možností by mělo být možné vytvořit skutečný MIDI kontrolér, s množstvím možností jak interpretovat údaje naměřené ne dvou nezávislých detektorech vzdálenosti (antény) a s výstupem na displej, který umožňuje navigaci ve funkcích a zobrazení odesílaných dat.

## **Závěr**

V předkládané diplomové práci je řešena konstrukce hudebního nástroje theremin a následně realizace výstupu thereminu pomocí MIDI rozhraní. V první části práce (*kap. 1*) je tento hudební nástroj a princip jeho fungování popsán v obecné rovině. Návrhu a konstrukci hudebního nástroje theremin je věnována druhá kapitola této práce. Větší část této kapitoly je věnována návrhu thereminu, kde jsou podrobně popsány jednotlivé části thereminu. Každá část je popsána z hlediska funkce, kterou v obvodu plní, principu a zapojení. Podle návrhu uvedeného v této kapitole byl zkonstruován vlastní theremin. Tento theremin, který byl postaven podle uvedeného návrhu, je popsán v druhé části druhé kapitoly (*kap. 2.2*). Ve třetí kapitole je popsán způsob jakým je provedena realizace řešení výstupu thereminu pomocí rozhraní MIDI. V závěru třetí kapitoly je zmíněno několik předběžných návrhů na vylepšení takto postaveného MIDI kontroléru.

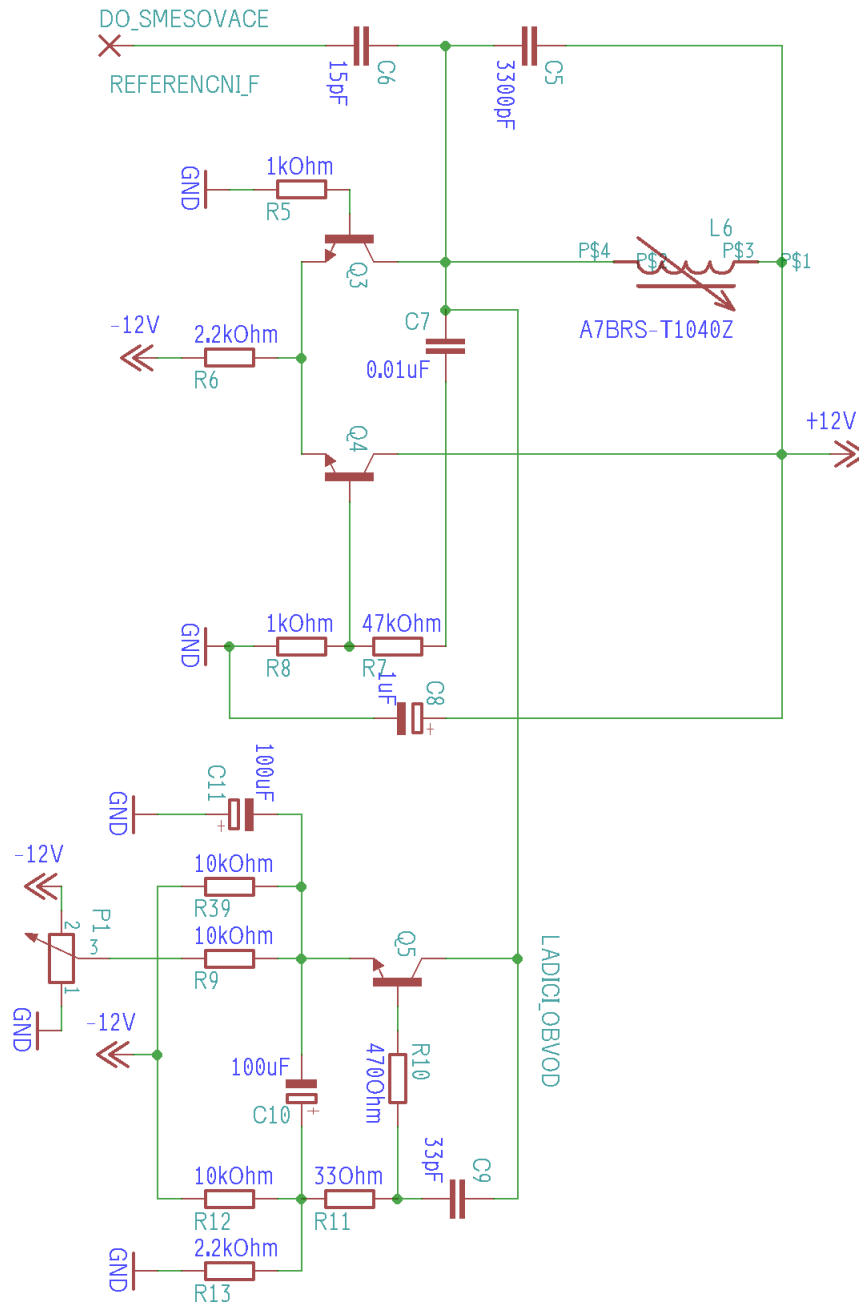
Zkonstruovaný prototyp zůstal bohužel, kvůli nedostatku času nedokončený. Prototyp se skládá jen z variabilního a referenčního oscilátoru, směšovače a výstupního zesilovače. U postaveného thereminu tak chybí obvod pro řízení hlasitosti. Výstupní signál thereminu má proměnnou frekvenci, která se pohybuje v rozmezí 0Hz až 3000Hz, ale kvůli chybějícímu řízení hlasitosti zůstává amplituda signálu konstantní. Prostřednictvím hardwaru a softwaru popsaném ve třetí kapitole je tato výstupní frekvence změřena a převedena do datového formátu který odpovídá normě MIDI. Realizace výstupu thereminu pomocí MIDI rozhraní byla úspěšná a prototyp thereminu odesílal MIDI zprávy do syntezátoru.

## Seznam literatury

- [1] Electricka. *The Theremin*. Exploring the arts foundation. [online]. © 2000-2015. [Cit. 1.12.2015].  
[http://electricka.com/etaf/muses/music/musical\\_instruments/musical\\_instrument\\_lineup/the\\_lineup/the\\_theremin/the\\_theremin\\_home.htm](http://electricka.com/etaf/muses/music/musical_instruments/musical_instrument_lineup/the_lineup/the_theremin/the_theremin_home.htm)
- [2] Theremin Vox. *Lev Sergeivitch Termen: The Inventor of the Theremin*. Theremin Vox – Lev Sergeivitch Termen: The Inventor of the Theremin. [online] 5.2.2001. © 2000-2006. [Cit. 10.12.2015].  
<http://www.thereminvox.com/article/articleview/8/1/1/index.html>
- [3] Theremin Vox. *Ether-Wave Music*. Theremin Vox – Ether-wave Music. [online] 26.2.2002. © 2000-2006. [Cit. 15.12.2015].  
<http://www.thereminvox.com/article/articleview/11/1/1/index.html>
- [4] SKELDON, Keneth D; RIED, Lindsay M.; MCINALLY, Vivienne; DOUGAN, Brendan; FULTON Craig. *Physics of the Theremin*. In American Journal of Physis. Vol. 66. No. 11. s. 945 – 955. Listopad 1998. Glasgow: University of Glasgow, Department of physics and astronomy. [online]. 15.10.2009. [Cit. 20.12.2015] Dostupné z: <http://www.element14.com/community/docs/DOC-16794/l/thereminamjphysexcellentpdf>
- [5] MOOG, Robert. *Build the EM Theremin*. In Electronic Musician s. 86 - 100. Únor 1996. b.m. [online]. 17.10.2009. [Cit. 18.1.2015] Dostupné z: <http://www.element14.com/community/docs/DOC-16870/l/build-the-em-thereminpdf>
- [6] MOOG, Robert. *Understanding, customizing and hot-rodding your etherwave theremin*. 2003. Moog Music Inc. [online]. 01.04.2016. [Cit. 10.04.2015] Dostupné z: <http://www.analoguehaven.com/moog/thereminblaCick/hotrod.pdf>
- [7] MUNDELL, Fred. *Geometry of theremin capacitance*. Únor 2013. Glasgow. [online]. 24.2.2013. [Cit. 10.04.2015] Dostupné z: <http://www.element14.com/community/docs/DOC-53107/l/geometry-of-theremin-capacitancepdf>
- [8] FORRÓ, Daniel. 1993. *MIDI komunikace v hudbě*. Praha: Grada a.s (1993). ISBN 80-85623-56-0.
- [9] Atmel Corporation. *ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P: Datasheet*. Listopad 2015. [online]. 01.05.2015. Dostupné z: [http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P\\_datasheet\\_Complete.pdf](http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf)

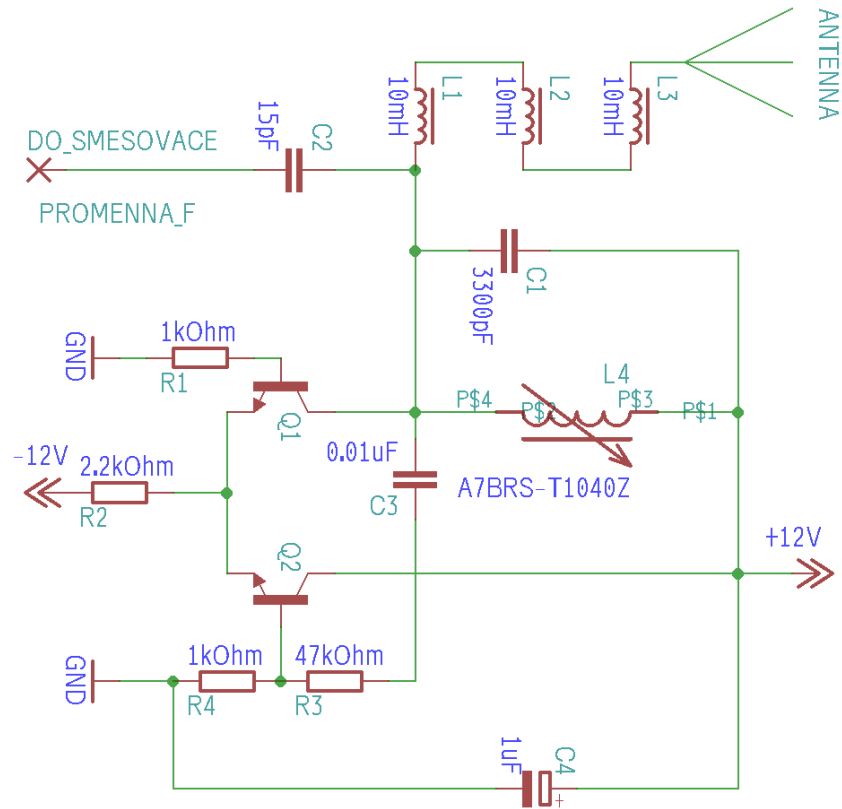
## Přílohy

### 1. Schéma zapojení referenčního oscilátoru

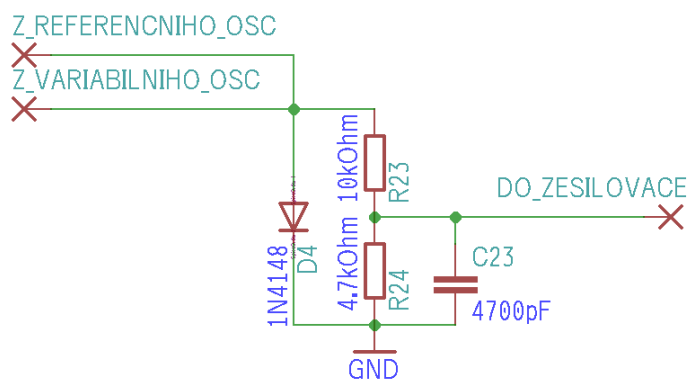




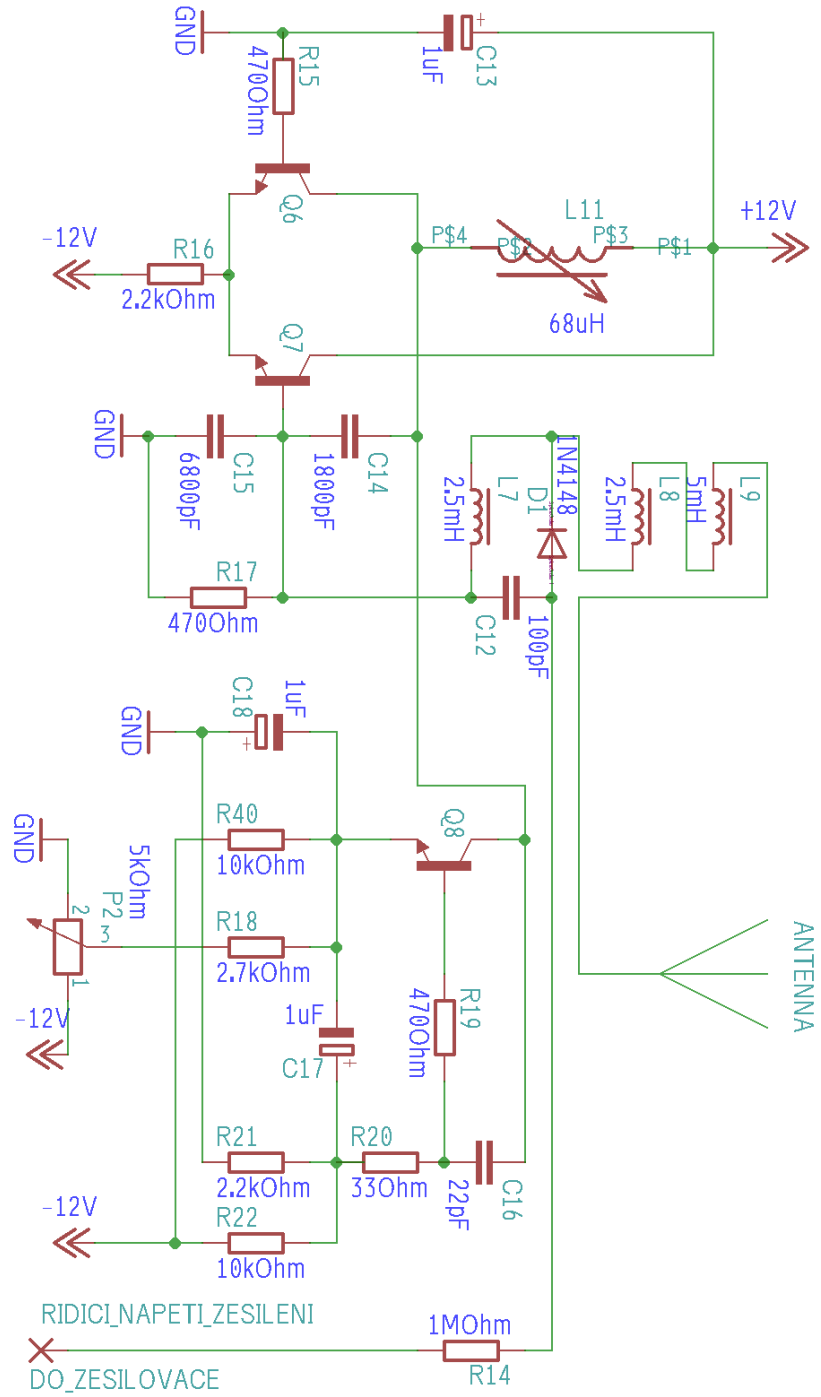
## 2. Schema zapojení variabilního oscilátoru



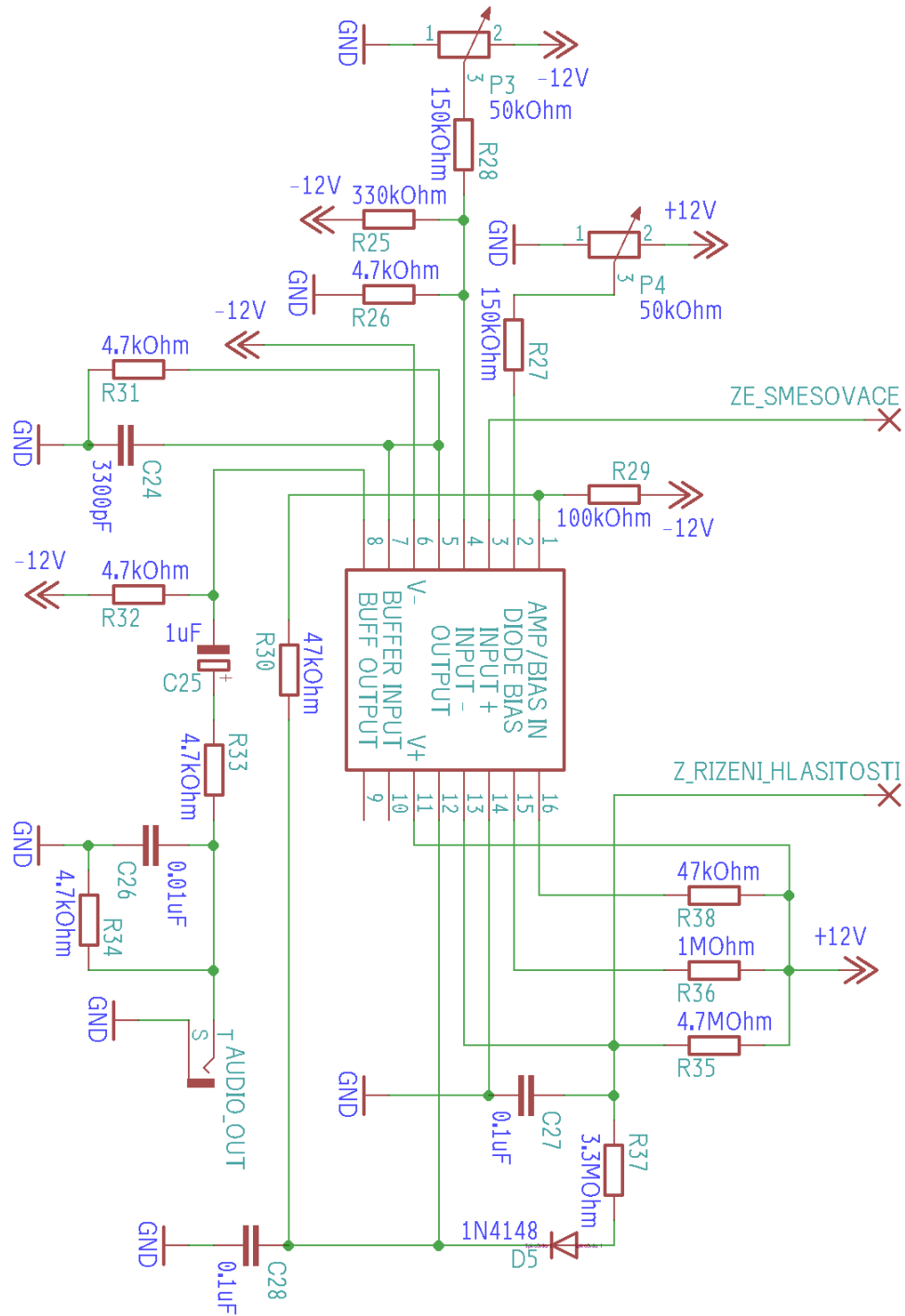
### 3. Schéma zapojení směšovače



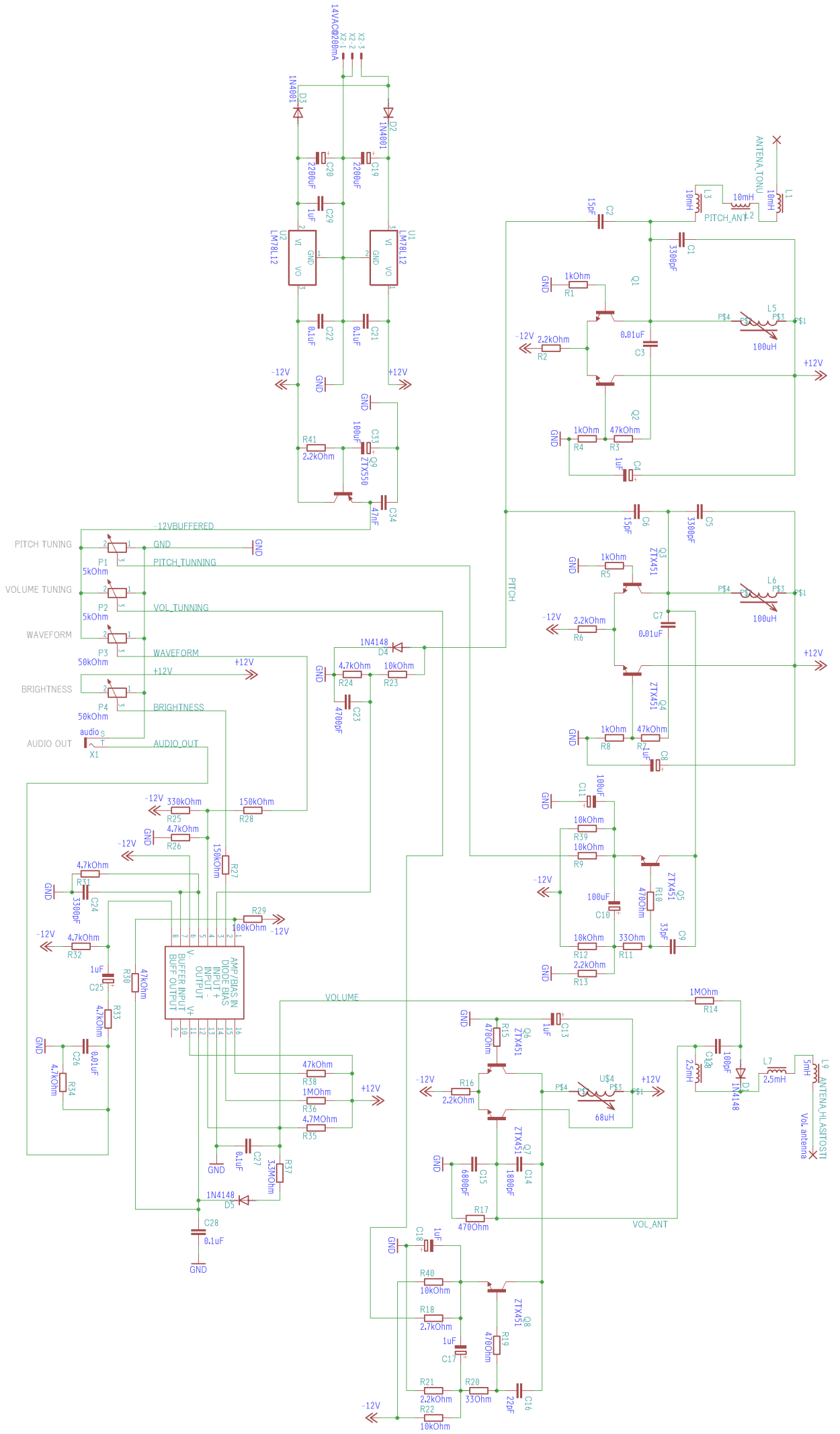
### 4. Schéma zapojení oscilátoru pro řízení hlasitosti



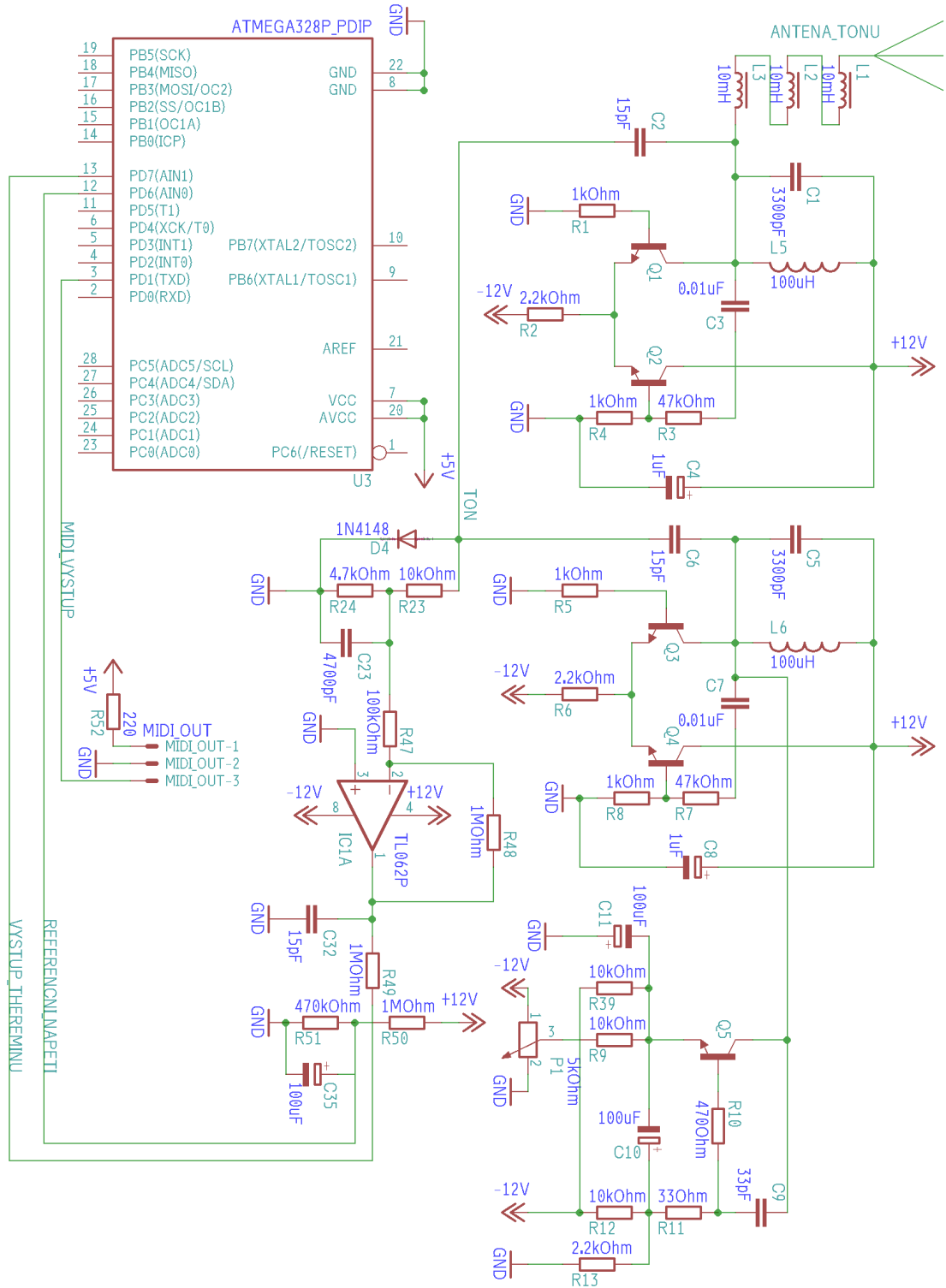
### 5. Schéma zapojení napětím řízeného zesilovačem



## **6. Celkové schéma zapojení**



## 7. Schéma zapojení prototypu



## 8. Zdrojový kód hlavního programu Theremin\_fin.ino

```

#include <FreqMeasure.h>
/**
 * rucni nastaveni
 */
#define noteON 144 //nota zapnuta
#define noteOFF 128 //nota vypnutá
#define pBend 224 //pitch bend
#define vel 75 //deafultni hlasitost
#define A 69 //midicislo noty A 440Hz
#define range 12 //rozsah pitch bend v pultonech +/- hodnota (nahoru i dolu)
/**
 * pro pitch bend se vypocitava LSB i MSB, pokud se do masky pro vypocet LSB zada 0
 bude se odesilat nulova hodnota LSB
 */
#define LSB 0//pokud syntetizator podporuje LSB hodnotu tak definovat 127, pokud ne
 tak 0
bool on; //příznak zapnuté noty
uint16_t prevBendVal; //predchozi hodnota pitch bend
uint8_t inc; //přírusek pitch bendu

void setup() {
/**
 * pocatecni nastaveni analogoveho komparatoru, citace a serioveho portu
 **/
Serial.begin(31250); //nastaveni serial portu
FreqMeasure.begin(); //nastaveni mereni frekvence; obsahuje nastaveni citace (vstup na
INput capture z komparatoru, nastaveni delice a povoleni interuptu
ADCSRB &= ~(1 << ACME); //multiplexer komparatoru vypnut
ACSR |= (1 << ACIS1); //rozhodovací hrana pro komparator
ACSR |= (1 << ACIC); //presmerovani vystupu z komparatoru na Input Capture
ACSR &= ~((1 << ACD) | (1 << ACBG) | (1 << ACIS0) | (1 << ACIE)); // Analog
Comparator disable off, bandgap off, falling edge bit 1, comaparator interrupt off

```



```

DIDR1 |= ((1 << AIN0D) | (1 << AIN1D)); // vypnutí digital input buffer AIN0/1
    //setPitchRange(12); //nastavení rozsahu pitch bend v pultonech +/- hodnota, pouze
pokud syntetizátor podporuje RPN - registered parameter number
    inc = 16384/(range*40); //inc = (pocet kroku pitch bend/pocet centu v rozsahu)*5;
vysledkem je pocet bitu pitch bend na zvyšení tonu o pet centu
    on = false; //nastavení příznaku zapnuté noty, nota je vypnuta
}

double sum = 0; //součet měření
int count = 0; //pocet měření

void loop() {
    if (FreqMeasure.available()) { //zahájení měření
        //unsigned long start_time =micros();
        /**
        * vypočtení průměru z několika měření frekvence
        */
        sum = sum + FreqMeasure.read();
        count = count + 1;
        if (count > 10) {
            float frequency = FreqMeasure.countToFrequency(sum / count);
            //unsigned long duration = micros() - start_time;
            uint8_t midinum = A + 12 * (log (frequency / 440) / log(2)); //převod naměřené
frekvence na midi číslo
            Serial.flush(); //pocka na vyprázdění zásobníku seriového portu
            /**
            * podmínka rozhodnutí je li změřená frekvence v rozsahu pitchbendu
            * pokud ano, pokračuje k dalším podmínkám
            * pokud ne, nedala nic a preskakuje na konec smyčky
            */
            if (midinum >= (A-range) && midinum <= (A+range)) {
                float bend = 8192 + (98304 / range) * (log (frequency / 440) / log(2)); //převod
naměřené frekvence na pitchbend noty A 440Hz; range/6 = pocet oktav v rozsahu

```

```
//98304 = 16384*6/range je pocet kroku (bitu) na oktavu
uint16_t bendVal = bend + 0.5; //matematicke zaokrouhleni pitchbend hodnoty na
cela cisla
/**
 * podminka startu, je nota vypnuta?
 * pokud ano, vysle zpravu nota zapnuta a prehodi prizna "on" na 1
 * pokud ne, vysle zpravu nota vypnuta a prehodi prizna "on" na 0
 */
if (!on) {
    message (noteON, A, vel);
    prevBendVal = bendVal;
    on = true;
}
/**
 * doslo ke zmene tonu (lise se aktualni hodnota PitchBend od predchozi)?
 * pokud ano, zapne se cyklus pro sklouznuti na novou notu
 * pokud ne, nedela nic
 * za podminkou nasleduje odeslani aktualniho pitch bend a jeho ulozeni
 */
if (prevBendVal != bendVal) {
    /**
     * cyklus pro sklouznuti nahoru
     */
    while (prevBendVal < bendVal) {
        prevBendVal += inc;
        message(pBend, prevBendVal&LSB, prevBendVal>>7);
    }
    /**
     * cyklus pro sklouznuti dolu
     */
    while (prevBendVal > bendVal) {
        prevBendVal -= inc;
    }
}
```

```
        message(pBend, prevBendVal&LSB, prevBendVal>>7);
    }
}

    message(pBend, bendVal&LSB, bendVal>>7 ); //zmena pitch bend na aktualni
hodnotu po doklouznuti
    prevBendVal = bendVal; //ulozeni aktualni hodnoty
}
else {
    /**
     * vypnuti noty pokud je namerena frekvence mimo rozsah
     */
    message(noteOFF, A, 0);
    on = false;
}
/**
 * nulovani promenych pro mereni frekvence
 */
sum = 0;
count = 0;
}
}
}
/**
 *funkce pro odesilani midi zprav
 */
void message (byte cmd, byte data1, byte data2) {
    Serial.write(cmd);
    Serial.write(data1);
    Serial.write(data2);
}
/**
 * funkce pro nastaveni rozsahu pitchbendu
```

\* nastavani se provadi pomoci RPN registered parameter number, syntetizátor musi RPN podporovat

\* pripadne je mozne rozsah PitchBend nasatavit rucen na syntetizatoru

\*/

```
void setPitchRange (byte numOfSemitones) {
```

```
    Serial.write(176);
```

```
    Serial.write(101);
```

```
    Serial.write(0);
```

```
    Serial.write(176);
```

```
    Serial.write(100);
```

```
    Serial.write(0);
```

```
    Serial.write(176);
```

```
    Serial.write(6);
```

```
    Serial.write(numOfSemitones);
```

```
    Serial.write(176);
```

```
    Serial.write(38);
```

```
    Serial.write(0);
```

```
    Serial.write(176);
```

```
    Serial.write(101);
```

```
    Serial.write(127);
```

```
    Serial.write(176);
```

```
    Serial.write(100);
```

```
    Serial.write(127);
```

```
    Serial.flush();
```

```
}
```

## 9. Zdrojový kód knihovny FreqMeasure pro měření frekvencí

### 9.1 Utils/FreqMeasureCapture.h

```
/* FreqMeasure Library, for measuring relatively low frequencies
 * http://www.pjrc.com/teensy/td_libs_FreqMeasure.html
 * Copyright (c) 2011 PJRC.COM, LLC - Paul Stoffregen <paul@pjrc.com>
 * Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy
 * of this software and associated documentation files (the "Software"), to deal
 * in the Software without restriction, including without limitation the rights
 * to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell
 * copies of the Software, and to permit persons to whom the Software is
 * furnished to do so, subject to the following conditions:
 * The above copyright notice and this permission notice shall be included in
 * all copies or substantial portions of the Software.
 * THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY
KIND, EXPRESS OR
 * IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF
MERCHANTABILITY,
 * FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO
EVENT SHALL THE
 * AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM,
DAMAGES OR OTHER
 * LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR
OTHERWISE, ARISING FROM,
 * OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER
DEALINGS IN
 * THE SOFTWARE.
 */
#ifndef FreqMeasure_capture_h_
#define FreqMeasure_capture_h_
// Arduino Uno, Duemilanove, LilyPad, Mini, Fio, etc
#if defined(__AVR_ATmega328P__) || defined(__AVR_ATmega168__)
#define CAPTURE_USE_TIMER1 // ICP1 is pin 8
#else
```

```
#error "Unknown chip, please edit me with timer+counter definitions"
#endif

#ifdef CAPTURE_USE_TIMER1
static uint8_t saveTCCR1A, saveTCCR1B;
static inline void capture_init(void) {
saveTCCR1A = TCCR1A;
saveTCCR1B = TCCR1B;
TCCR1B = 0;
TCCR1A = 0;
TCNT1 = 0;
TIFR1 = (1<<ICF1) | (1<<TOV1);
TIMSK1 = (1<<ICIE1) | (1<<TOIE1);
}
static inline void capture_start(void) {
TCCR1B = (1<<ICNC1) | (1<<ICES1) | (1<<CS10);
}
static inline uint16_t capture_read(void) {
return ICR1;
}
static inline uint8_t capture_overflow(void) {
return TIFR1 & (1<<TOV1);
}
static inline void capture_overflow_reset(void){
TIFR1 = (1<<TOV1);
}
static inline void capture_shutdown(void) {
TCCR1B = 0;
TIMSK1 = 0;
TCCR1A = saveTCCR1A;
TCCR1B = saveTCCR1B;
}
#endif
```

```
#define TIMER_OVERFLOW_VECTOR TIMER1_OVF_vect
#define TIMER_CAPTURE_VECTOR TIMER1_CAPT_vect
#endif // CAPTURE_USE_***
#endif
```

## 9.2 FreqMeasure.h

```
#ifndef FreqMeasure_h
#define FreqMeasure_h

#include <Arduino.h>

class FreqMeasureClass {
public:
    static void begin(void);
    static uint8_t available(void);
    static uint32_t read(void);
    static float countToFrequency(uint32_t count);
    static void end(void);
};

extern FreqMeasureClass FreqMeasure;

#endif
```

## 9.3 FreqMeasure.cpp

```
/* FreqMeasure Library, for measuring relatively low frequencies
 * http://www.pjrc.com/teensy/td\_libs\_FreqMeasure.html
 * Copyright (c) 2011 PJRC.COM, LLC - Paul Stoffregen <paul@pjrc.com>
 * Version 1.1
 * Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy
 * of this software and associated documentation files (the "Software"), to deal
 * in the Software without restriction, including without limitation the rights
 * to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell
 * copies of the Software, and to permit persons to whom the Software is
 * furnished to do so, subject to the following conditions:
```

- \* The above copyright notice and this permission notice shall be included in
- \* all copies or substantial portions of the Software.
- \* THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR
- \* IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY,
- \* FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE
- \* AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER
- \* LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM,
- \* OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN
- \* THE SOFTWARE.
- \*/

```
#include "FreqMeasure.h"
#include "util/FreqMeasureCapture.h"
#define FREQMEASURE_BUFFER_LEN 12
static volatile uint32_t buffer_value[FREQMEASURE_BUFFER_LEN];
static volatile uint8_t buffer_head;
static volatile uint8_t buffer_tail;
static uint16_t capture_msw;
static uint32_t capture_previous;

void FreqMeasureClass::begin(void) {
  capture_init();
  capture_msw = 0;
  capture_previous = 0;
  buffer_head = 0;
  buffer_tail = 0;
  capture_start();
}
```



```
uint8_t FreqMeasureClass::available(void) {
uint8_t head, tail;
head = buffer_head;
tail = buffer_tail;
if (head >= tail) return head - tail;
return FREQMEASURE_BUFFER_LEN + head - tail;
}
uint32_t FreqMeasureClass::read(void) {
uint8_t head, tail;
uint32_t value;
head = buffer_head;
tail = buffer_tail;
if (head == tail) return 0xFFFFFFFF;
tail = tail + 1;
if (tail >= FREQMEASURE_BUFFER_LEN) tail = 0;
value = buffer_value[tail];
buffer_tail = tail;
return value;
}
float FreqMeasureClass::countToFrequency(uint32_t count){
#ifdef __AVR__
return (float)F_CPU / (float)count;
#elif defined(__arm__) && defined(TEENSYDUINO) && defined(KINETISK)
return (float)F_BUS / (float)count;
#elif defined(__arm__) && defined(TEENSYDUINO) && defined(KINETISL)
return (float)(F_PLL/2) / (float)count;
#endif
}

void FreqMeasureClass::end(void) {
capture_shutdown();
}
```

```
#if defined(__AVR__)

ISR(TIMER_OVERFLOW_VECTOR) {
capture_msw++;
}

ISR(TIMER_CAPTURE_VECTOR) {
uint16_t capture_lsw;
uint32_t capture, period;
uint8_t i;
// get the timer capture
capture_lsw = capture_read();
// Handle the case where but capture and overflow interrupts were pending
// (eg, interrupts were disabled for a while), or where the overflow occurred
// while t_msw++;
}
// compute the waveform period
capture = ((uint32_t)capture_msw << 16) | capture_lsw;
period = capture - capture_previous;
capture_previous = capture;
// store it into the buffer
i = buffer_head + 1;
if (i >= FREQMEASURE_BUFFER_LEN) i = 0;
if (i != buffer_tail) {
buffer_value[i] = period;
buffer_head = i;
}
}

#endif

FreqMeasureClass FreqMeasure;
```