



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EXPERIMENTÁLNÍ HARDWAROVÝ HUDEBNÍ NÁSTROJ NA PRINCIPU FM SYNTÉZY ŘÍZENÝ BEZKONTAKTNÍM OVLADAČEM

EXPERIMENTAL HARDWARE MUSICAL INSTRUMENT BASED ON FM SYNTHESIS CONTROLLED BY A
CONTACTLESS CONTROLLER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Vejvoda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Zdeněk Vejvoda

ID: 203752

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální hardwarový hudební nástroj na principu FM syntézy řízený bezkontaktním ovladačem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a realizace experimentálního elektroakustického hardwarového hudební nástroje. Experimentálnost spočívá v neobvyklém způsobu řízení parametrů FM syntézy pomocí bezkontaktního ovladače.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GUŠTAR, M. Elektrofony II. Uvnitř, Praha, 2008. ISBN 978-80-239-8447-7.

[2] FORRÓ D. Svět MIDI. Grada, Praha, 1997. 375s. ISBN 80-7169-412-6.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

V bakalářské práci byl navrhnout a zkonstruován experimentální analogový syntetizér. Teoretická část se věnuje základnímu rozdělení elektroakustických nástrojů a blíže popisuje některé zástupce, kteří byli důležití pro inspiraci při návrhu anebo pro samotný historický vývoj. V další části jsou uvedeny metody zvukové syntézy, které jsou doplněné o jejich hudebně-estetické vlastnosti. Dále jsou uvedeni historičtí zástupci hudebního a zvukového experimentování, z jejichž myšlenkových východisek byly extrahovány některé potřeby, které byly uplatněny při návrhu nástroje. Praktická část se zabývá technickým rozбором všech dílčích bloků, zejména oscilátorů a způsobem implementace frekvenční modulace. Postup je doložen elektrotechnickými schématy, grafy a nezbytnými výpočty. Závěrem je produkt složen na desku plošných spojů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezkontaktní ovládání, Edgard Varese, experimentální zvuk, frekvenční modulace, konkrétní hudba, napětím řízený oscilátor, syntezátor, theremin, zvuková syntéza.

ABSTRACT

The focus of this bachelor thesis was a design and consequently an assembly of an experimental analog synthesizer. The beginning of the theoretical framework presents the classification of the electroacoustic instruments into subgroups with an emphasis on those which were essential for both the inspiration of the design and for the historical development itself. The subsequent chapter explores the sound synthesis methods and their musical attributes. Afterwards, particular fundamental personae of the history of experimenting with sound and music are mentioned, whose ideas were extracted for the purpose of designing this instrument. The practical part explains the motivation which was present during the work and develops it into a full circuit design. The creative process is supported by explanation of attached diagrams and required calculations. In conclusion, the assembled prototype is presented on a printed circuit board.

KEYWORDS

Concrete music, contactless controller, Edgard Varese, experimental sound, frequency modulation, sound synthesis, synthesizer, theremin, voltage-controlled oscillator.

VEJVODA, Zdeněk. *Experimentální hardwarový hudební nástroj na principu FM syntézy řízený bezkontaktním ovladačem*. Brno, 2020, 62 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Experimentální hardwarový hudební nástroj na principu FM syntézy řízený bezkontaktním ovladačem“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. MgA Mgr. Danu Dlouhému Ph.D. za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci. Dále chci poděkovat všem přátelům a kolegům, rodině, přítelkyni a zejména prarodičům za všestrannou podporu při studiu.

Obsah

Úvod	15
1 Teoretická část	17
1.1 Úvod do problematiky elektroakustických hudebních nástrojů	17
1.2 Základní typy syntézy zvuku	20
1.2.1 Aditivní (součtová) syntéza	20
1.2.2 Subtraktivní (rozdílová) syntéza	20
1.2.3 Modulační syntéza	21
1.2.4 Další typy syntéz	24
1.3 Experimentální hudba a hudební hluk	26
1.3.1 Futuristé	26
1.3.2 Edgard Varèse	27
1.3.3 Konkrétní hudba	28
2 Praktická část	31
2.1 Popis funkce a ovládání syntezátoru	31
2.2 Části zařízení	32
2.2.1 Napájení	32
2.2.2 Generátor modulačního signálu	33
2.2.3 Zesilovač modulačního signálu	35
2.2.4 Generátor nosného signálu – VCO	36
2.2.5 Výstupní blok	38
2.3 Podoba nasimulované modulace	38
2.4 Realizace	41
2.4.1 Oživení	41
2.4.2 Reakce na ovládání a charakteristika zvuku	42
2.4.3 Možné hudební využití	43
Závěr	45
Literatura	47
Seznam symbolů, veličin a zkratk	51
Seznam příloh	53
A Kompletní schéma	55
B Breadboard	57

C	Seznam součástí	59
D	DPS	61
D.1	Návrh	61
D.2	Před osazením	61
D.3	Po osazení	62

Seznam obrázků

1.1	Pilový signál modulovaný zkreslenou harmonickou vlnou.	23
2.1	Blokové schéma zařízení.	31
2.2	Napájecí obvod.	32
2.3	Astabilní multivibrátor[23].	33
2.4	Fixní a variabilní oscilátor vstupující do rozdílového zapojení směšovače.	34
2.5	Průběh fixního a variabilního signálu.	34
2.6	Průběh 12 period výstupu směšovače.	35
2.7	Tranzistorový zesilovač se společným emitorem.	35
2.8	Napětím řízený oscilátor generující pravoúhlý signál.	37
2.9	Průběh výstupu integrátoru, tj. vstupu komparátoru (trojúhelník) a výstupu komparátoru (obdélník).	37
2.10	Koncový stupeň syntezátoru.	38
2.11	Signál na výstupu integrátoru („trojúhelník“) a komparátoru (pravoúhlý) po připojení modulačního napětí.	39
2.12	Pravoúhlý signál reaguje změnou délky periody na okamžitou hodnotu harmonického signálu.	39
2.13	Nejnižší možná frekvence modulátoru 3,2 kHz (ruka mimo aktivní pole snímače).	41
2.14	Při stejném nastavení trimru a ruce v těsné blízkosti je frekvence modulátoru 9,2 kHz.	41
2.15	Nosný signál.	42
2.16	Modulovaný signál – ruka mimo aktivní pole snímače	42
2.17	Modulovaný signál – ruka v těsné blízkosti snímače	42
A.1	Kompletní schéma zařízení.	55
B.1	Obvod složený na nepájitivém poli vývojového prostředí <i>Bastl Instruments OMSynth</i>	57
D.1	Návrh desky plošných spojů.	61
D.2	Zhotovená deska plošných spojů před osazením.	61
D.3	Zhotovená deska plošných spojů po osazení.	62

Seznam tabulek

2.1	Tabulka frekvenčních výkyvů.	40
-----	--------------------------------------	----

Úvod

Bakalářská práce vychází z předchozí semestrální práce, jejíž téma bylo navrhnout blíže nespecifikovaný experimentální hardwarový hudební nástroj. V té bylo specifikováno na jakém principu bude nástroj zvuk vydávat, jaké budou jeho funkce, a jak budou ovladatelné. Vše se nacházelo v rovině návrhu, konstrukční část nebyla zahrnuta. Výsledkem byl návrh analogového syntezátoru, jehož hlavní parametr je řízen bezkontaktně. Syntéza zvuku probíhá frekvenční modulací a zmíněný hlavní parametr je frekvence modulačního signálu. Předkládaná bakalářská práce zahrnuje poznatky a výsledky výpočtů z prvotního návrhu, rozšiřuje je a v poslední fázi tvaruje syntezátor do reálné podoby. Struktura práce je následující:

První kapitola je uvedením do historie elektroakustických nástrojů. Nástroje jsou podle principu jejich funkce rozděleny do jednotlivých skupin a podskupin. Dělení následují příklady poznatků z mechaniky a akustiky, které daly za vznik prvním nástrojům využívajícím elektrickou energii. Dále je téma zúženo pouze na nástroje, které operují na výhradně elektronickém principu, a to z důvodu, že mezi ně se nástroj této práce řadí.

Speciální pozornost si vyžádal theremin – vynález Lva Těrmena. Jeho elektronický hudební nástroj je zásadní inspirací pro vznik onoho bezkontaktního ovládání. A proto se poslední oddíl této kapitoly zabývá detailnějším rozbohem funkcí a ovládání thereminu.

Druhá kapitola zkoumá zvuk z technické stránky. Jak napovídá název nástroje – syntezátor (nebo také syntetizér) – zvuk v něm musí být nějakým způsobem syntetizován. Jak k elektronické syntéze dochází, a speciálně, o metodě kterou využívá tento nástroj, je k nalezení v této části. Text je více zaměřen na analogové metody, neboť rovina, ve které nástroj operuje je čistě analogová. Avšak pro lepší orientaci v problematice jsou na závěr uvedeny i metody digitální syntézy.

V poslední kapitole jsou uvedeny příklady historických směrů a někteří jejich zástupci, kteří posloužili spíše jako obecná inspirace. Mimo netradiční řízení syntézy v nástroji je očekávána i netradiční zvuková barva a celková povaha výstupu. To vedlo k rozboru myšlenek Luigiho Russola a Francesca Pratelly, futuristických hudebníků, jakožto prvních protagonistů hudebního hluku. V návaznosti na ně jsou popsány myšlenky a postupy experimentálního skladatele a velkého obdivovatele elektronických nástrojů včetně thereminu Edgarda Varèse[7]. A byl to on, kdo jako jeden z prvních splňoval četné množství požadavků konkrétní hudby; filozofie, kterou jako první popsal Pierre Schaeffer[18].

Charakter pracovního postupu se v mnohých místech protíná s dogmaty konkrétní hudby; bez určitého směřování k finálnímu rysu (vjemů vizuálních i sluchových) bude nejdříve shromážděn materiál k jeho výrobě. V tomto případě se jedná

o elementární elektrotechnické součástky (rezistory, kondenzátory, tranzistory atd.). Následně budou pospojovány s jediným záměrem, a to generace zvuku frekvenčně-modulačním způsobem. Záměrem není napodobovat zvuk thereminu ani jiných zavedených syntetizérů pracujících na principu FM.

V praktické části je uvedeno blokové a úplné schéma zapojení se simulacemi výstupního signálu celku i dílčích bloků, které je doplněno průvodcem signálovou cestou skrz celým nástrojem. Hmotným produktem je funkční syntezátor, fungující jak nezávisle, tak v propojení s externím zesilovačem. Nepředvídaný a stěží odhadnutelný zvuk odhalí svojí povahu až po zkompletování nástroje. V závěrečných kapitolách budou popsány jeho struktury a barvy, prozkoumány reálné možnosti ovládacích prvků a zohledněny anomálie v chování nástroje.

1 Teoretická část

1.1 Úvod do problematiky elektroakustických hudebních nástrojů

Mezi členy základního dělení nástrojů – samozvučné (idiofony), blanozvučné (membranofony), strunné (chordofony), vzduchové (aerofony) – byly později přidány elektrické (elektrofony).

Elektrofony lze dle Hornbostel–Sachsova způsobu dělit na elektroakustické a elektronické. Pojem elektrické nástroje (který má vlastně být souhrnným názvem pro celou skupinu) se ustálil pro nástroje elektroakustické, elektrofonické a elektrifikované, tzn. ty, které nelze plnohodnotně využít bez elektrického snímání, respektive zesilování (např. elektrická kytara). Nástroje, u nichž je zvukový signál generován a zpracováván cestou čistě elektrickou, jsou označovány jako elektronické. Podle typu zpracování signálu jsou dále děleny na analogové, digitální a hybridní[8]. Absence digitálního principu v tomto projektu odůvodňuje další nerozebírání nástrojů, které v ní pracují.

Tedy, zde je jeden z nejzazších záznamů o elektrifikovaném nástroji: V roce 1745 proběhl zajímavý experiment v provedení Ewalda Jurgense. Podařilo se mu vyrobit první kondenzátor – Leydenskou láhev – která byla schopná akumulovat elektrický náboj. Jurgensovy poznatky využil český kněz Prokop Diviš; v roce 1753 vznikl záznam o hudebním nástroji zvaném Denis d'Or (Zlatý Diviš), jehož každá ze 790 strun měla jiný elektrický náboj, dodaný z Leydenských lahví. Nástroj dále obsahoval 3 klaviatury, 14 rejstříkových ovladačů a podle červencových *Tübingských učených zpráv* z roku 1754 byl schopen napodobit zvuky harfy, klavíru, fagotu, klarinetu, cembala, lesního rohu a dalších nástrojů[8].

Nicméně, pro tuto práci je účelnější, soustředit se na zdroje zvuku, jejichž smysl nespočíval v napodobování existujících nástrojů, nýbrž ve vytváření unikátních ryze elektronicky produkovaných zvukových barev.

V roce 1681 pozoroval Robert Hooke fenomén přerušovaného tónu, jenž spočíval v přiložení listu papíru k rotujícímu ozubenému kolu s určitým počtem zubů a rychlostí otáčení. Hooke zjistil, že zvuk produkovaný třením papíru o kolo je přímo úměrný počtu zubů a rychlosti otáčení kola. Na tento experiment navázal Louis Friedrich Wilhelm August Seebeck v druhé čtvrtině 19. století. Sestrojil sirénu, která pracuje na principu vzduchu, který proudí skrz rotující kolečko, mající díry po svém obvodu. Produkovaný zvuk byl opět úměrný počtu děr a jejich četnosti[8].

Ačkoliv byly Hookeovy a Seebeckovy pokusy provedeny pro ryze akustické účely, zásadně přispěly ku vývoji prvního významného elektronického nástroje zvaného

Telharmonium.

Telharmonium anebo také Dynamophone byl nástrojem amerického hudebníka Thaddeuse Cahilla. Signál v něm byl generován rotačními válcovými elektromagnetickými přerušovači – rheotomy. Procházející proud byl přerušován v intervalech nastavených rychlostí rotace válců a také počtem vodivých segmentů, které byly rovnoměrně rozmístěny po obvodu válce. Obdélníkový proudový signál byl následně průchodem několika induktory upraven na přibližně sinusový průběh. Frekvence sedmi rheotomů na jedné hřídce byly v celočíselných poměrech – tomu rozumějme, že prvnímu válci (fundamentu) byly ostatní vyššími harmonickými. Takových hřidel bylo celkem dvanáct a mezi sebou byly laděny v rovnoměrně temperovaném ladění[8].

Syntéza zvuku na Telharmoniu probíhala aditivní metodou, která bude vysvětlena v kapitole 1.2.1. Úpravou úrovní tónů na různých hřídkách a rheotomech a následným smícháním pomocí transformátorů bylo možno vytvořit širokou škálu barev zvuku. K nástroji byla přiložena klaviatura, která u první verze nástroje snímala i rychlost stisku klávesy, čímž byla ovládána dynamika tónu. O reprodukci se staraly trychtýřovité papírové zvukovody připojené přímo k nástroji, ale jak již napovídá název Telharmonium, byl hudební signál primárně určen k přenosu po telefonní síti a reprodukci běžnými telefonními sluchátky. Celková hmotnost třetí a poslední verze Dynamophonu byla kolem 140 tun, rozměr 22×4 metry. Celkový výkon alternátorů, které nahradily rotační přerušovače, dosahoval přes 1,5 MW. Proudová úroveň signálu ve sluchátku dosahovala od 50 mA do 1 A. Z dobových výpovědí je známo, že signál byl občas tak silný, že sluchátko ani nebylo zapotřebí zvedat, a také rušilo telefonní spojení mezi telefonujícími. Náklady na konstrukci se pohybovaly kolem 200 000 \$. Velké nadšení v roce 1906, kdy bylo Telharmonium uvedeno ve vlastní koncertní síni, bylo záhy vystřídáno nezájmem, zejména kvůli rušení v telefonní síti. „Comeback“ realizovaný třetí verzí nebyl efektivní a společnost Thaddeuse Cahilla v roce 1914 zkrachovala. O 4 roky později byl nástroj pravděpodobně sešrotován[8].

V roce 1920 představil Lev Sergejevič Těrmen svým nejbližším spolupracovníkům na leningradském Fyzikálně-technickém institutu svůj nástroj, který on sám pojmenoval Etherphone, v širším spektru však známý jako theremin. Při svých experimentech zjistil, že kapacita lidského těla může ovlivňovat frekvenci oscilace elektronky. Tato kapacita byla snímána bezkontaktně částí nástroje, který bývá nesprávně označován jako anténa. Vzhledem k tomu, že „anténa“ nereaguje na elektromagnetické vlny, nýbrž pouze na změnu elektrické kapacity jejího okolí, přesnější je označení kapacitní snímač[9].

Výšku tónu udávaly dva oscilátory. Frekvence prvního byla uživatelsky variabilní. Hráč pohybem směrem ke snímači snižoval kapacitu v oscilátoru. Kondenzátor vzniká mezi snímačem a hráčovou rukou, jež je uzemněna zbytkem těla. Čím je

vzdálenost mezi „deskami kondenzátoru“ (mezi rukou a snímačem) menší, tím je vyšší frekvence tónu[13].

Oscilace na frekvenci na frekvenci přibližně 170 kHz se směřovala uvnitř nástroje s frekvencí druhého (fixně nastaveného) oscilátoru lišící se o stovky až tisíce Hz. Výsledkem tohoto mixu jsou záznamy nacházející se ve slyšitelné oblasti. Později byla Těrmenem přidán druhý snímač na stejném principu, pomocí kterého byl obhospodařována hlasitostní obálka.

Typické používání nástroje spočívá v přibližování ruky k výškovému snímači po horizontální ose, k hlasitostnímu po vertikální. Toto opatření bylo zavedeno, aby nedocházelo k ovládání dvou parametrů jednou rukou[9].

1.2 Základní typy syntézy zvuku

V následující kapitole proběhne obeznámení se základními typy zvukové syntézy, včetně FM syntézy, která je kvůli následnému uplatnění v konstrukční části nejdůležitější [26][22][21][27][6][2].

1.2.1 Aditivní (součtová) syntéza

Aditivní syntéza je jedna z nejstarších metod syntetické tvorby zvuku. Spočívá v generování jednotlivých harmonických složek, v nejjednodušším případě sinusových průběhů, které po sečtení udávají výsledný tón. S jistou nadsázkou můžeme tvrdit, že první nástroj využívající tohoto postupu (avšak v rámci akustických nástrojů) jsou varhany. V nich tvoří zvukovou barvu více píšťal hrající ve stejný čas, které jsou od sebe tónově vzdáleny o příslušné intervaly (vyšší tóny jsou vyššími harmonickými složkami fundamentu).

Speciálním případem je harmonická syntéza (rovnice (1.1)), která sčítá pouze harmonické signály. Prakticky se jedná o realizaci Fourierovy řady. Pomocí té lze při nekonečné iteraci k -tého prvku dosáhnout aproximace jakéhokoli periodického průběhu.

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(\omega kt + \varphi_k). \quad (1.1)$$

Nad postupem při aditivní syntéze má hudebník velkou kontrolu, díky které je možno dosáhnout velmi přímočarého napodobení zvuků z reálného světa, máme-li k dispozici jejich spektrální analýzu. Problém spočívá v četnosti harmonických složek reálných nástrojů a zvuků. K dosažení určité požadované kvality a věrohodnosti, by bylo zapotřebí zapojit desítky oscilátorů, které by harmonické složky jednotlivě generovaly. Přestože je při dnešní výpočetní síle reálná cesta digitální realizace, nenašla metoda velké uplatnění ani v tomto směru. Volba zvukové barvy, která spočívá pouze ve výběru vhodných harmonických složek a úpravách jejich amplitud může být vskutku dlouhý a neatraktivní proces[26][22].

1.2.2 Subtraktivní (rozdílová) syntéza

Subtraktivní metoda je komerčně nejrozšířenějším typem syntézy. Je tomu tak, díky její jednoduchosti a konstrukční nenáročnosti, což se kladně odráží i na ceně zařízení disponujících touto technologií.

Její princip koresponduje se vznikem lidského hlasu anebo zvuku v hudebních nástrojích; nevznikají nové harmonické složky. Je generován tón, který má v základu velice bohaté spektrum, jehož složky jsou dále již jen potlačovány či zvýrazňovány

kmitočtovými filtry. Dají se dále dělit na statické formantové anebo dynamické. Při rozdělování do těchto skupin je určující, zdali je mezní frekvence filtru nepřeladitelná, či přeladitelná napěťově řízeným filtrem (VCF). Řízenou filtrací můžeme docílit tzv. rezonanční syntézy, která spočívá ve zúžení šířky pásma filtru. Zvuk generovaný rezonanční syntézou má vysoký „hvízdavý“ charakter[26][21].

1.2.3 Modulační syntéza

Z rovnice harmonického signálu (1.2) jsou známy tři základní veličiny. Pokud se jedna z těchto veličin – frekvence, amplituda nebo fáze – periodicky mění v čase podle příslušné rovnice, pak hovoříme o modulaci.

$$u(t) = U_m \cdot \cos(\omega t + \varphi), \quad (1.2)$$

kde U_m je amplituda, ω je úhlová frekvence a φ fáze signálu.

Pro práci s tématem modulace je třeba se obeznámit s následující pojmy[11]:

Nosný signál (angl. carrier) je prvopočáteční (stavební) signál, který je modulován. Pokud v daný okamžik není modulován, je slyšet ve své základní nepozměněné podobě.

Modulační signál, modulátor (angl. modulator) je signál, který je modulován na nosný signál. Samostatně není slyšet, jeho vliv se pouze podepisuje na výsledném znění nosného signálu. Nemusí se nacházet ve slyšitelném pásmu, přesto jsou jeho účinky na nosný signál sluchově zřejmé – je to údaj o tom, jak se bude v čase měnit frekvence, amplituda či fáze nosného signálu.

Modulovaný signál – výsledný signál po uplatnění modulační techniky.

Použití modulace, jako metody zvukové syntézy, je založeno na nelinearitě celého procesu. Ve spektru pozorujeme nejen složky nosného a modulačního signálu, ale také jejich součty a násobky, které dohromady tvoří hutný výsledný signál, který je bohatý na harmonické složky a může mít jak tónový, tak šumový charakter, a to v závislosti na poměrech číselných hodnot frekvencí nově vzniklých složek ve spektru[21].

Amplitudová modulace (AM)

Tento typ modulace upravuje v čase okamžitou výchylku nosného signálu. Hlavní dva parametry modulačního signálu jsou frekvence a hloubka modulace. Modulovaný signál je popsán rovnicí (1.3):

$$u(t) = A_0[1 + \alpha \cdot \cos(\omega_M t)] \cdot \cos(\omega_N t), \quad (1.3)$$

kde A_0 je amplituda nosného signálu, α je hloubka modulace, ω_M je úhlová frekvence modulačního signálu, ω_N je úhlová frekvence nosného signálu[27].

Hloubka modulace je číslo na intervalu mezi 0 a 1 a často se udává v procentech. Udává, jak se změní amplituda nosného signálu v kmitně nebo uzlu. Vypočte se podle rovnice (1.4).

$$m = \frac{\Delta U_C}{U_C} \cdot 100, \quad (1.4)$$

kde m je hloubka modulace v procentech, U_C je amplituda nosné vlny bez modulace a ΔU_C je změna amplitudy nosné vlny.

V radiové technice se používá pro přenos vysílání na dlouhých a středních vlnách. Informace (vysílání) je vyjádřeno modulací amplitudy nosného signálu, který je vysílán na kmitočtech 525–1605 kHz (středně dlouhé vlny)[2].

V rámci zvuku se vzhledem k sluchovým možnostem lidského ucha pracuje s menšími kmitočty. Tremollo je technika hry na hudební nástroj, která v případě elektronické simulace využívá principy amplitudové modulace. Standardní topologie zapojení tremolla spočívá v nízkofrekvenčním oscilátoru (LFO), který ovládá napětím řízený zesilovač.

Ve spektru modulovaného signálu se objeví násobky rozdílů frekvencí nosné frekvence (zvuku vstupujícího do tremolla) a modulační frekvence (LFO) – postranní složky. Při zvyšování modulační frekvence do řádů stovek nebo tisíců Hertz vznikají další nové postranní složky ve spektru. Výsledný zvuk působí roztřeseně[21].

Kruhová modulace (RM)

Kruhová modulace je speciálním případem amplitudové modulace. Stejně jako u AM vznikají postranní složky jako výsledky součtů a rozdílů vstupujících signálů s rozdílem, že oba vstupní signály jsou kompletně potlačeny[21]. Název modulace vychází z vzhledu schématického zapojení diod do pomyslného kruhu[26]. Kruhový modulátor byl hojně využíván k dosažení amplitudové modulace před vynalezením napětím řízeného zesilovače (VCA).

$$A(t) = C(t) \times M(t), \quad (1.5)$$

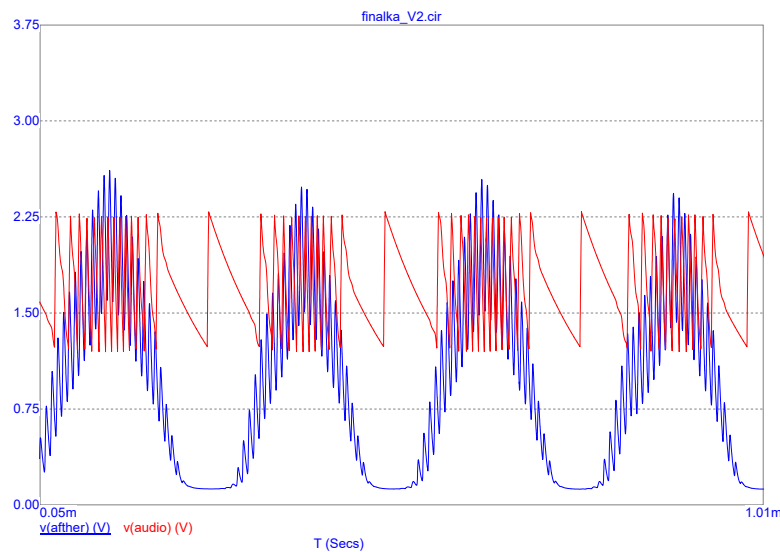
kde veličiny $C(t)$ a $M(t)$ označují nosný a modulační signál. Na jejich pořadí nezáleží, mohou být zaměněny.

Zvuky, které vznikají jako výsledek kruhové modulace jsou, obzvláště při velkém rozdílu vstupních frekvencí, řinčivé, zvonivé, inharmonické. K harmonicitám může dojít pouze v případě, že nově vzniklé součtové složky jsou od sebe vzdáleny v harmonickém poměru[21].

Frekvenční modulace (FM)

Za zkratkou FM stojí výraz frekvenční modulace. Pro zvukovou syntézu technologii poprvé implementoval Dr. John Chowning v roce 1973 [21]. Podstata FM syntézy spočívá v rozvibrování nosného signálu modulačním signálem.

Modulovaný signál vlivem časové proměnnosti frekvence ztrácí svou periodicitu. Rozdíl mezi krajními hodnotami frekvence určuje frekvenční zdvih, polovinou této hodnoty je frekvenční odchylka Δf . Výsledná frekvence modulovaného signálu osciluje mezi $(f_{\text{nosná}} - \Delta f)$ a $(f_{\text{nosná}} + \Delta f)$ [6].



Obr. 1.1: Pilový signál modulovaný zkreslenou harmonickou vlnou.

Na obrázku 1.1 vidíme, že frekvence pilového signálu reaguje na okamžitou výchylku modulačního signálu.

Další veličinou je modulační index m_f . Jedná se o poměr mezi frekvenční odchylkou Δf a nejvyšší použitou modulační frekvencí. Modulační signál totiž nemusí být harmonický a může mít více složek ve spektru. Do rovnice (1.6) se vkládá hodnota frekvence nejvyšší složky[6]

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} \cdot 100. \quad (1.6)$$

Veličina m_f je modulační index v procentech, Δf je frekvenční odchylka v Hz a f_m je nejvyšší složka spektra v Hz.

Rovnice modulovaného signálu vypadá takto:

$$u(t) = U \cdot \cos[\omega_N t + m_f \cdot \sin(\omega_M t)]. \quad (1.7)$$

Indexu N odpovídá nosný signál, indexu M odpovídá modulační signál.

Po zvukové stránce dosahujeme FM syntézou zajímavých zvukových barev. Při volbě frekvence modulačního signálu 0,2–20 Hz se chová oscilátor jako LFO a výsledný zvuk simuluje techniku hry vibráto. Čím více se zvyšuje frekvence modulačního signálu, tím více člověk ztrácí schopnost vnímat zvuk jako prosté chvění tónu. Když modulační signál nabývá frekvence řády stovek či tisíců Hertz, vznikají spektra velmi bohatá na nové složky, které bývají spíše v inharmonických poměrech.

Zdrojům nosných a modulačních signálů, které v procesu figurují se říká operátory. Operátory mají dva nastavitelné parametry, to jest frekvenci a amplitudu. Algoritmus zapojení operátorů se může lišit. Modulátory mohou být řazeny kaskádově nad sebou nebo paralelně. U každého z nich může být zavedena zpětná vazba.

První úspěšný, masově rozšířený nástroj, který pracoval na principu digitální FM syntézy, je *Yamaha DX-7*, syntezátor uvedený v roce 1983. Využíval 6 sinusových operátorů.

V praxi lze použít libovolný průběh signálu. Zapojení operátorů, které disponují složitějšími průběhy (pilový, obdélníkový), povede k vytvoření ještě bohatších spekter než v případě sinusových průběhů.

Při spojování operátorů a vytváření sítě parametrizací mezi nimi, nelze ve velké míře uvažovat ladění tónů a intervalů mezi nimi. Při použití komplikovaných průběhů, které jsou nesené větším počtem modulátorů, vytváří uživatel non-tónové zvonivé zvuky, které se uplatní raději na poli experimentu[22].

1.2.4 Další typy syntéz

Výčet uvedených syntéz jistě není kompletní. Vybrané způsoby jsou zmíněny kvůli možnosti analogové realizace. To ovšem neznamená, že je nelze realizovat digitálně (jako v případě *Yamaha DX7*).

Přesto bude pro získání přehledu několik metod výhradně digitální syntézy stručně popsáno [26].

- Granulární syntéza. Spočívá v ukládání krátkých zvukových vzorků (10–50 ms), které jsou následně promíchány a rychle za sebou přehrávány. Charakter výstupního zvuku může být různý, záleží především na délce a barvě vzorků.
- Wavetable (tabulková) syntéza. V ROM jsou uloženy vzorky základních průběhů – sinus, pila, obdélník, trojúhelník, bílý šum atd. Uživateli je umožněno vyvolávat tyto signály, popřípadě jejich přechodné tvary.
- Fyzikální modelování. Všechny zvuky vycházející z akustických nástrojů jsou charakterizovány různými faktory – velikost a tvar jejich těl, tvarem vzduchového sloupce, typem plátku, tloušťkou struny, velikostí nátrubku... Tyto specifika jsou převedeny do matematických modelů. Z každého modelu je možno

využít libovolný specifický prvek a po jejich následném prolnutí lze vytvořit například zvuk flažoletu hraného na tympány pomocí trombónového nátrubku.

1.3 Experimentální hudba a hudební hluk

Jak napovídá název práce, zvuk, který by nástroj měl vydávat, bude experimentálního charakteru. Myšlenkové směry, jimiž byl z různých důvodů ovlivněn, ať už při návrhu zařízení anebo predikci výsledné zvukové povahy, budou představeny v následující kapitole [19][16][17][3][7][18].

1.3.1 Futuristé

Se založením futuristického hnutí v roce 1909 založeném F. T. Marinettim vzniká i jeho hudební odnož. Vytyčil ji Francesco Balilla Pratella svým *Manifestem futuristických hudebníků (1910)* [19].

Ve svém textu si stěžuje na organizované ubíjení talentu mladých studentů v režii hudebních akademií a omezování jejich vynalézavých, vlastních tvůrčí tendencí. Vadí mu nekonečné odkazování se na „velkou slavnou minulost“ a neschopnost odchýlit se od starých postupů ve smyslu výuky, kompozice i interpretace hudby. Italské školy pojmenovává jako pastmi na umění a budoucí hudebníky. Učitelům a protagonistům tehdejšího hudebního myšlení vytýká slabý ideologický základ. Vidí problém ve vydavatelstvím svázaném hudebně-kulturním prostoru, který nenabízí místo pro nezávislost tvorby hudebníka, jako jediného důležitého člena v řetězci hudební produkce.

V závěru manifestu vyzývá své sympatizanty k činu, velice agresivně je nabádá k opuštění hudebních institucí a k zanevření nad zajetými, dle vlastních slov „zatuchlými“ metodami, čímž chce docílit zevrubné revoluce chápání hudby pod vlajkou futuristického hnutí.

V roce 1913, jako vyjádření souhlasu a podpory, píše Pratellovi otevřený dopis futuristický malíř Luigi Rusollo. Dokument nese název *Umění hluku* [16] a rozvíjí úvodní myšlenku.

Úvodem popisuje náhled na hudební postupy v minulosti – čisté pythagorejské intervaly, důraz na konsonanci ve středověké hudbě a lidových písních. Dále navazuje na později se uplatňující zálibu v záměrně použitých disonancích, které v moderní hudbě mnohdy zabrušují až do drsností, jež opět nemohou být finální stanicí vývoje hudební estetiky, ba naopak neúprosně vedou ku vzniku éry hudebního hluku. Dopisem chce docílit dalšího kroku v dějinách hudby, ve které již dále nepředpokládá inovace na poli harmonie ani melodie pro vyčerpanost jejich možností.

Hluk definuje jako zvuk okolí, na který je lidské ucho již dobře zvyklé – cvakot kopyt o dlažbu, šumění listí, úder hromu, lidský hlas vyjma řeči a zpěvu, projevy zvířat a samozřejmě lomoz strojů, které jsou modlou všem futuristům. Přestože je hluk pro lidské ucho povětšinou nežádoucím jevem, lze ho aranžovat ve všemožných

sekvencích, nechat ho přicházet nepravidelně a neuspořádaně, a tím tvořit hudební mozaiku. Navíc nabízí paralelu, že disonantní tóniny byly kdysi v minulosti také nežádoucími či nepřípustnými.

Přesto Luigi Russolo uvažuje o hudbě hluků jako o tónové záležitosti. Je zastán-
cem faktu, že v rámci každého hluku lze hledat tón, či dokonce souzvuk více tónů. V případě, že by hledaný tón v hluku splýval, rychlým periodickým opakováním zvuku se tónového charakteru docílí. Také opovrhne tradiční rytmikou a dodává, že hluky samy o sobě poskytují ty nejrozmanitější rytmy[16].

Ze stejného roku jako tento dopis pochází Russolův vlastní nástroj zvaný Intona-
rumori. Jednalo se o soubor různě velkých kvádrů, z každého byl vyveden trychtý-
řovitý radiátor. Mechanickými i elektronickými mechanizmy byly vybuzovány akus-
tické zvuky a nimi napodobovány hluky, jak je znal z reálného světa, o různých
intenzitách, rychlostech a barvách. Zmíněné mechanizmy byly různé páky či elek-
tronické ovladače, kterými Russolo ovládal o struny drhnoucí rotující kola. S jejich
pomocí mohl ladit tóny i půltóny.

Vymyslel vlastní notový zápis, který se zanášel do partitury, v níž měla každá
část (pojmenována např. jako: „šumič“, „hvízdač“, „bzučák“, „vrnič“ atp.) souboru
Intonarumori svůj vlastní part. Přestože do notové osnovy obsahující pět linek, klíč
a standardní označení taktu nepsal notami, stále metoda zápisu velmi připomíná
dodnes používaný zápis[17].

1.3.2 Edgard Varèse

„Vyhýbejte se rutině a začínejte pokaždé, jako byste nikdy nezačali, jako byste nic
nevěděli! Jen myslte a cítě.“[3]

Smýšlení Ferruccio Busoniho, které se poodhaluje tímto citátem, zásadně ovlivnilo
tvorbu francouzského skladatele Edgarda Varèse. Odkaz na jeho osobu a práci je
obsažen zejména z toho důvodu, že ho Pierre Schaeffer zmiňuje jako vůbec prvního
hudebního tvůrce, který splňoval parametry konkrétní hudby (více v kapitole 1.3.3).

Hudba je dle Varèse názoru spojením umění a vědy (zahrnující technologie),
v roce 1939 ji na přednášce v Californii kategorizuje jako *artis scientiae*. Odkazuje
na středověký akademický systém, ve kterém měla hudba svoje místo v *quadriviu*
mezi matematikou, astronomií a geometrií. Všechny tyto obory, jako syn inženýra,
výborně ovládal a hudbu samotnou chápal jako průnik tří výše zmíněných oborů.

Varèse neuvažuje melodii jako stavební kámen hudebního díla, nýbrž mluví o zvuk-
ovém pohybu, který definuje v dimenzi horizontální, vertikální a dynamické. Pro
tuto definici hledá rozumnější zápis nežli tradiční notový, který vypovídá především
jen o výšce a délce tónu. Pohyb zvuku chce zaznamenávat novými grafickými sym-
boly, kterými by dosáhl inovativního smýšlení v kompozici[7]. Tento zápis uplatnil

v orchestrálních skladbách, které byly určeny zejména pro:

- perkuse – podrobný popis akcentování a dynamických odstínů, experimentování s různými typy excitátorů, nezvyklé (např.: kovadlina) a nové nástroje (např.: lion's roar – buben se strunou),
- sirény,
- dechové nástroje – komplexní práce s glissandy, dynamické křivky proplétající se napříč mezi různými dechy v orchestru,
- theremin – jako první ho obsadil v orchestru, a to ve své skladbě Equatorial (1934).

Pro theremin měl Varèse velké nadšení. Vytvořila se zajímavá paralela mezi jeho představou o zvukovém pohybu a faktem, že zvukový pohyb thereminu je excitován jen a pouze pohybem těla, bez nutnosti jakékoli další interakce. Se Lvem Těremenem se Varèse pokoušel osobně spojit před Těremovým zatknutím a odvečením na Sibiř v roce 1938, avšak jeho snahy se nesetkaly s úspěchem[7].

Nadšení pro technologie vyjádřil i skladbou Deserts z roku 1954, ve které našel v orchestru místo zvuk přehrávaný z magnetofonového pásku[18].

1.3.3 Konkrétní hudba

Na přelomu 40. a 50. let 20. století přichází Pierre Schaeffer s uvažováním o nových hudebních postupech. Jako první rozřadil hudbu na abstraktní a konkrétní. Rozdělení určuje skladatelův kompoziční algoritmus. Zjednodušeně řečeno, je vznik konkrétní hudby inverzním procesem skládání hudby abstraktní.

Abstraktní (neboli tradiční) hudba má počátek v abstraktní myšlence. Tuto myšlenku skladatel zhmotní pomocí notového zápisu a posléze ji nechá zahrát orchestr. Cesta tvorby tedy vede z abstraktní dimenze do konkrétní.

Zato hudba konkrétní postupuje naopak. Nejdříve se vytvoří či izoluje konkrétní materiál. Následně se upravuje, aranžuje, produkuje, dokud nevznikne dílo, které svoji myšlenku a charakter odhalí až v momentě, kdy se nachází ve své finální podobě. Tehdy je připraveno odhalit své rysy, svou povahu, a tím následně vytvořit abstraktní dojem.

Na otázky, jak shromáždit materiál určený k tvorbě konkrétní hudby, nabídl Schaeffer čtyři odpovědi:

- Úprava existujících hudebních nástrojů. A jejich používání nestandardními způsoby. (To nebylo revoluční novinkou, upravený klavír používal před Schaefferem mimo jiné i Varèse.)
- Obecnost zvukových zdrojů. Zvuky vycházející ze zvukových zdrojů se snímají mikrofonom na magnetofonový pásek. Při umístění mikrofónů do nezvyklých poloh se může docílit extrakce zajímavých zvukových barev a nehudebních

rejstříků zvukového zdroje. Se záznamem se dále předpokládá práce v post-produkci – transpozice, dozvuk, modulace. . .

- Uzavřená drážka. Velký převrat v tvorbě konkrétní hudby způsobil první výskyt opakujících se segmentů (loopingu), které byly dosaženy vytvořením uzavřené smyčky na gramofonu.
- Čistě elektronické zvuky. Zpočátku byla tato praktika zřídka užívanou, a to pro nedostatečný technologický pokrok. S postupem času se po ní sahalo častěji, až se u některých děl či směrů (Kolínská škola) stala dominantou.

První díla konkrétní hudby Pierra Schaeffera ve spolupráci Pierra Henryho byla inspirována Edgardem Varèse, jako jejich jediným vzorem pro nově vznikající filozofii.

Pro zvukové koláže sestavené ze zvuků různého původu, které jsou po aplikovaných transformacích smíchány mezi sebou, začíná být pojem hudebního nástroje problémem, a proto se volí raději názvu zvukového objektu.

Tón je v tradičním notovém zápisu charakterizován informací o jeho výšce a délce trvání. V konkrétní hudbě je pro svoji komplexnost nahrazen pojmem hudební objekt, a tudíž se liší i grafický vzhled zápisu. Cílem směru je odlišit zvukový objekt od aparátu, jenž ho vytváří a hudební objekt od znaku, jenž ho popisuje.

Při tvorbě konkrétní hudby si Schaeffer uvědomuje, že její tvůrce plní dvě role, které tehdy ještě měly značně vymezená území. Je to činnost instrumentalisty ve studiu – rozeznívání nástrojů, produkování hluků, ovládání gramofonu atp. a práce inženýra, jenž upravuje zvuk v kabině zvukové režie, řeší metody snímání. . .

Úvahy o rozpolcení přináší nápad, zdali by nebylo záhodno provést fúzi těchto oborů, což by zajisté rozšířilo vnímání akustiky ve fyzikálním a fyziologickém rozměru ve vztahu k estetickému prožívání.

Ze Schaeffrovy zkušenosti zatím spolupráce výzkumné skupiny vědecko-fyzikální a vědecko-hudební revoluční výsledky nepřinesla, neboť cítí, že každá z těchto skupin je schopna nabídnout pouze dílčí náhled na problematiku, a to pouze ze strany svého oboru s nedostatkem respektu pro skupinu spolupracující. A právě proto je otevřen cestě ku vzniku mezioborovému odvětví, ve kterém by odborníci nebyli inženýři se zálibou v hudbě, stejně tak hudebníci rozumějící základům akustiky, nýbrž vysoce kvalifikovaní vzdělanci obou oborů zároveň[18].

2 Praktická část

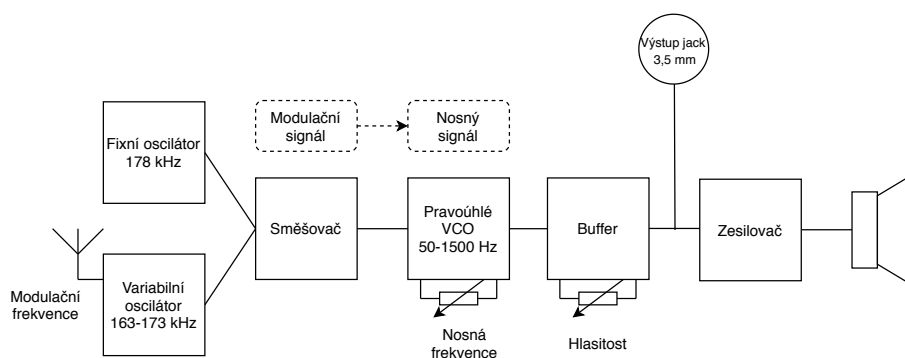
Tato část je věnována návrhu zařízení; budou vysvětleny funkce a princip ovládání nástroje, provedeny výpočty, předvedeno schéma obvodu. Podle schematu bude nástroj složen nejdříve na nepájivé pole. Budou okomentováno jeho ovládání, výstupní zvuková charakteristika a poté bude napájen na desku plošných spojů.

Myšlenkový směr konkrétní hudby posloužil jako hlavní opěrný bod při návrhu zvukového objektu. Postup při sestavování a kombinování jednotlivých bloků nebyl zatížen imaginací, které by měl syntezátor být prostředkem. Jedná se o čistý experiment využití funkční části existujícího nástroje (výškový oscilátor thereminu) jako modulačního operátoru FM syntézy. Ta byla zvolena pro svoji nelineární charakteristiku a schopnost překvapit svou zvukovou barvou, a to zejména při zapojení neharmonických signálových průběhů[21]. Z toho důvodu byl vybrán pravouhlý signál jak pro oba oscilátory skládající modulační signál, tak pro průběh nosného operátoru, jehož střída byla navíc vychýlena ze symetrie.

Po ověření technické funkčnosti se poprvé naskytne příležitost vystavit své smysly zkompletovanému produktu a přenést nově nabytými dojmy rozměr díla z konkrétního do abstraktního.

2.1 Popis funkce a ovládání syntezátoru

První blok inspirovaný výškovým oscilátorem thereminu se obdobně sestává ze tří částí. Je to fixně nastavený oscilátor, variabilní oscilátor, jenž je ovládán přibližováním ruky ke kapacitnímu snímači, a směšovačem, který od sebe signály odčítá, a tím vytváří průběh v uchem slyšitelné šířce pásma. Původní obvod byl rekonstruován pomocí zapojení s integrovanými obvody.



Obr. 2.1: Blokové schéma zařízení.

Kvůli stáří a zavedenosti thereminu nelze jeho bezkontaktní ovládání považovat za příliš experimentální. Výstup směšovače však není připojen na výstupní jednotku,

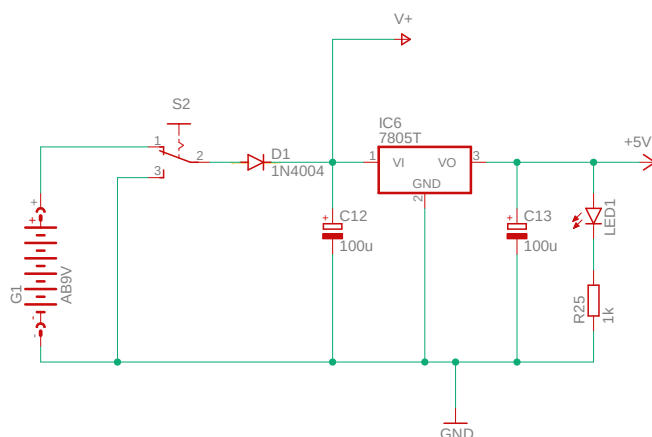
opravdová barva zvuku bloku není odhalena. Je totiž připojen na vstup nosné vlny, což dává za vznik frekvenční modulaci[10]. Změnou polohy ruky ke snímači tedy není určována výška tónu, nýbrž frekvence modulačního signálu.

Nosným operátorem je napětím řízený oscilátor (VCO), který má obdélníkový tvar průběhu a jeho frekvenci lze přeladit potenciometrem vyvedeným na šasi nástroje.

V řetězci následuje buffer, který signál stabilizuje a je zde uživatelsky nastavitelná hlasitost logaritmickým potenciometrem. Poté signál odbočuje do výstupu jack 3,5 mm. V případě, že je konektor vsunut dovnitř, je následující blok je odpojen. V opačném případě je signál nasměrován do zesilovače, který zesiluje signál pro zabudovaný reproduktor.

2.2 Části zařízení

2.2.1 Napájení



Obr. 2.2: Napájecí obvod.

Energii do obvodu dodává 9V baterie. Napětí, které je schopna poskytnout, je ve schématu 2.2 označeno jako V+. Toto napětí je zdrojem pro integrované obvody CD40106, LM358, LM386. Dále je zdrojem pro regulátor LM7805.

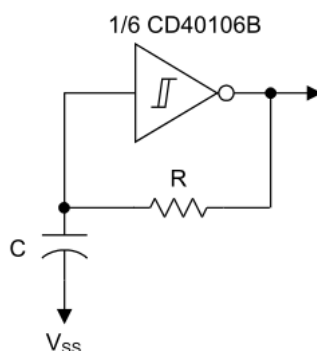
Výstupem regulátoru je stabilizované napětí 5 V, které je zdrojem pro MCP602 a určuje pracovní bod tranzistoru T1. LED signalizuje, že je zařízení zapnuté a rezistor R25 omezuje proud procházející diodou, zabraňuje jejímu zničení. Elektrolytické kondenzátory C12 a C13 slouží jako stabilizátory a jsou zapojeny podle doporučení z datasheetu LM7805[25].

2.2.2 Generátor modulačního signálu

Jako modulátor v tomto FM obvodu pracuje signál, který vznikne smíšením signálů dvou vysokofrekvenčních oscilátorů. Oba tyto signály jsou generovány astabilními multivibrátory, které používají Schmittovy klopné obvody integrované v čipu CD40106. V datasheetu[23] integrovaného obvodu můžeme vyhledat rovnici (2.1), pomocí které lze určit periodu kmitání dílčích oscilátorů, pokud jsou vstupy a výstupy čipu zapojeny jako astabilní multivibrátor. Ten vznikne spojením vstupu a země kondenzátorem a zároveň spojením vstupu a výstupu rezistorem, jak je patrné z obrázku 2.3.

$$t = RC \cdot \ln \left[\left(\frac{U_P}{U_N} \right) \left(\frac{U_{DD} - U_N}{U_{DD} - U_P} \right) \right], \quad (2.1)$$

kde U_P je horní úroveň hystereze, U_N je spodní úroveň hystereze U_{DD} je napájecí napětí integrovaného obvodu CD40106. Hysterezní napětí pro dané napájecí napětí poskytuje tabulka v datasheetu[23].



Obr. 2.3: Astabilní multivibrátor[23].

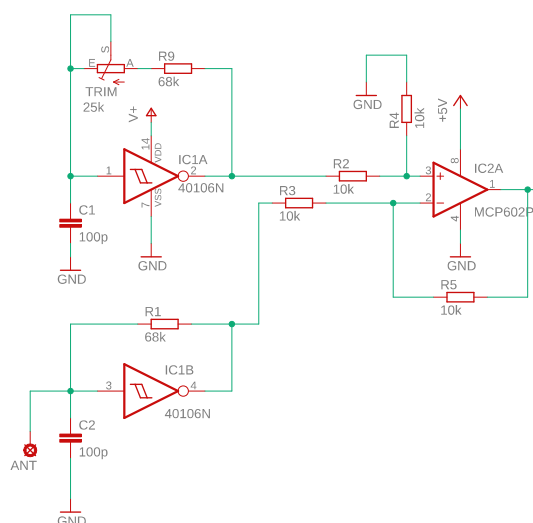
Na obrázku 2.4 jsou dva astabilní multivibrátory. IC1A je variabilní oscilátor disponující snímačem, který je na obrázku označen jako „ANT“, a je paralelně připojen ke kondenzátoru C2. Ruka hráče, která se bude vzdalovat (resp. přibližovat) snímači, způsobí změny kapacity v obvodu, což se projeví změnami výstupní frekvence. Pro rovnici (2.2.2) se kapacita přidaná snímačem odhaduje na 3 pF[4].

IC2B je fixní oscilátor, který je doplněn 25 kΩ trimrem. Ovládání trimru nebude uživateli přístupné, slouží pouze pro prvotní naladění nástroje, aby rozdíl frekvencí obou oscilátorů byl v pásmu slyšitelných frekvencí.

Dosazení hodnot do rovnice (2.1) pro variabilní oscilátor:

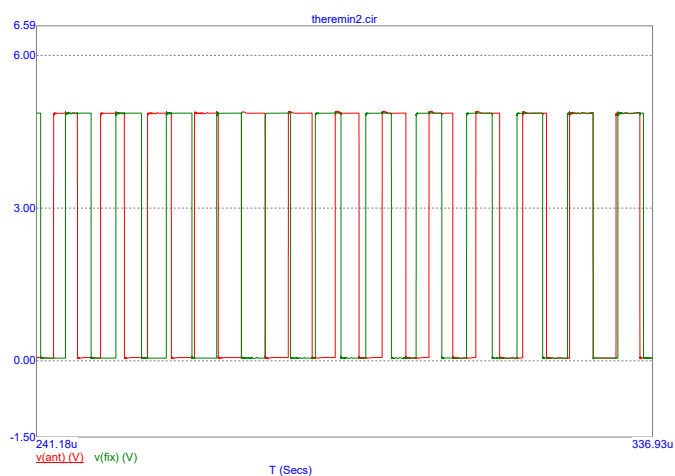
$$t_{\text{var}} = 68000 \cdot 103 \cdot 10^{-12} \cdot \ln \left[\left(\frac{2,9}{1,9} \right) \left(\frac{3,1}{2,1} \right) \right] = 5,690 \mu\text{s}. \quad (2.2)$$

Perioda variabilního oscilátoru podle $f = \frac{1}{t}$ odpovídá frekvenci 175 762 Hz.



Obr. 2.4: Fixní a variabilní oscilátor vstupující do rozdílového zapojení směšovače.

Obrázek 2.5 pochází ze softwaru *Micro-Cap* a zobrazuje průběhy fixního a variabilního vysokofrekvenčního oscilátoru.



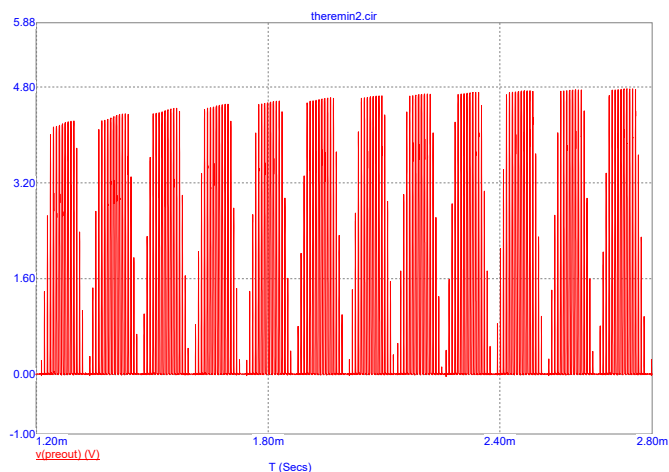
Obr. 2.5: Průběh fixního a variabilního signálu.

Dosazení hodnot do rovnice (2.1) pro fixní oscilátor (trimr nastaven na 4000Ω):

$$t_{\text{fix}} = 72000 \cdot 100 \cdot 10^{-12} \cdot \ln \left[\left(\frac{2,9}{1,9} \right) \left(\frac{3,1}{2,1} \right) \right] = 5,690 \mu\text{s}. \quad (2.3)$$

Perioda fixního oscilátoru podle $f = \frac{1}{t}$ odpovídá frekvenci 170 977 Hz.

Jako směšovač těchto dvou signálů je použit integrovaný obvod MCP602 v rozdílovém (diferenciálním) zapojení. Jeho výstup je dán rozdílem signálů fixního a variabilního oscilátoru, vyobrazen je v simulaci na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Průběh 12 period výstupu směšovače.

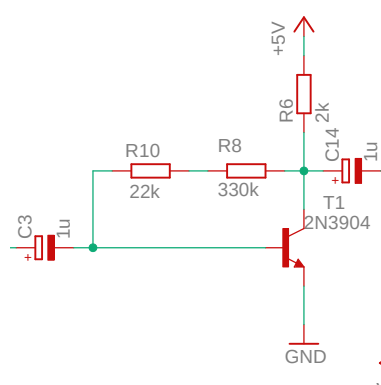
Dochází k rázům, jejichž obálka charakterizuje výstupní signál směšovače. Dosazením rovnic a pro zvolenou kapacitu snímače 3 pF lze určit frekvenci rázů.

$$f_{\text{rázy}} = f_{\text{var}} - f_{\text{fix}} = 175\,762 - 170\,977 = 4\,785 \text{ Hz} \quad (2.4)$$

Modulační signál by při těchto podmínkách kmital frekvencí 4 785 Hz.

2.2.3 Zesilovač modulačního signálu

Aby došlo ke znatelnému efektu modulačního signálu na nosný, je pro zvýšení hloubky modulace potřeba modulační signál zesílit. Pro tento účel byl použit tranzistorový zesilovač, a to konkrétně typ zapojení se společným emitorem. Schéma tohoto bloku je na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Tranzistorový zesilovač se společným emitorem.

Pro toto zapojení, které využívá zpětnou vazbu byl stanoven pracovní bod následovně: Napětí na bázi bylo určeno jako $U_B = 0,7 \text{ V}$, aby došlo k zprůchodnění

NPN přechodu. Napájecí napětí poskytované regulátorem 7805 je $U_{CC} = 5\text{ V}$. Stejnoseměrné napětí na kolektoru bylo stanoveno na $U_C = 3\text{ V}$. Požadovaný proud kolektorem je $I_C = 1\text{ mA}$, tomu odpovídající $\beta = 150$ [15].

Z těchto hodnot byl nejdříve stanoven proud bázi:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0,001}{150} = 6,667\ \mu\text{A}. \quad (2.5)$$

A z této hodnoty byla určena hodnota zpětnovazebního odporu. Tento odpor je na schematu 2.7 zastoupen seriovou kombinací rezistorů R8 a R10.

$$R_B = \frac{U_C - U_B}{I_B} = \frac{3 - 0,7}{6,66 \cdot 10^{-6}} = 350\ \text{k}\Omega \quad (2.6)$$

Nyní zbývalo pouze určit hodnotu odporu R6:

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_C}{I_B + I_C} \approx \frac{5 - 3}{0,001} = 2\ \text{k}\Omega. \quad (2.7)$$

Pro oddělení stejnosměrné složky na vstupu a výstupu byly použity elektrolytické kondenzátory C3 a C14 s hodnotou $1\ \mu\text{F}$.

2.2.4 Generátor nosného signálu – VCO

Následující obvod je napětím řízený oscilátor (VCO) a generuje nosný signál pravoúhlého tvaru. Návrh byl inspirován[12].

Vstupním napětím je $V+$, které je regulovatelné potenciometrem R26. Otáčením potenciometru se určuje frekvence nosného signálu. Na vstup je také přivedeno modulační napětí z předchozího bloku. To v této podkapitole bude uvažováno jako odpojené. Připojení bude realizováno v kapitole 2.3.

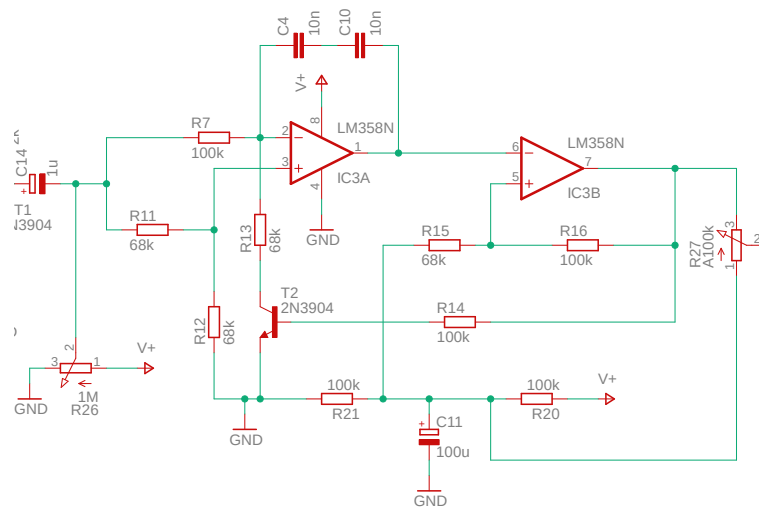
Uživatелеm nastavené napětí je přivedeno na oba vstupy operačního zesilovače LM358 (IC3A) zapojeného jako integrátor. Dělič napětí složený kombinací rezistorů R11 a R12 vytváří offset pro neinvertující vstup. Toto opatření je pro funkci nezbytné, protože je čip napájen pouze napětím kladné polarity.

Oscilační cyklus se může nacházet ve dvou stavech.

- Tranzistor T2 je vypnutý – seriová kombinace kondenzátorů C4 a C10¹ se nabíjí a výstup integrátoru pozvolna klesá. Komparátor IC3B drží spodní úroveň výstupního napětí, která udržuje PN přechod tranzistoru uzavřený.
- Na neinvertujícím vstupu komparátoru IC3B je nastavena děličem napětí prahová úroveň. Když výstup integrátoru překročí tuto mez, změní komparátor svůj výstup na vrchní saturační napětí. Úbytek napětí na R14 se objeví na bázi T2. Kondenzátor, který je nyní připojen přes tranzistor k zemi, se vybije.

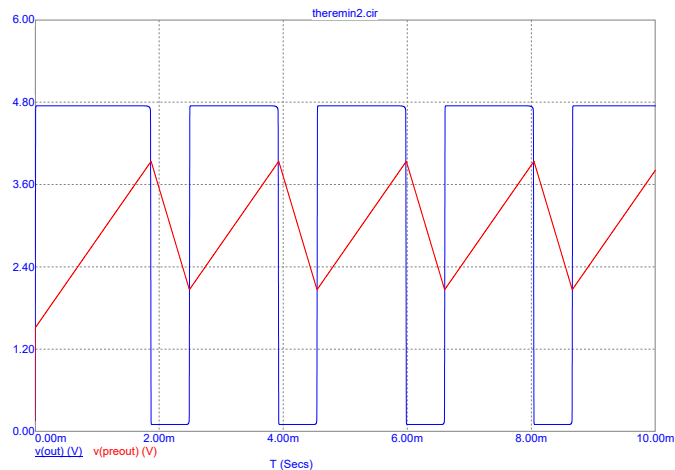
¹V popisu bude komentováno pouze jako jeden kondenzátor. Kombinace je využito pouze pro úpravu celkové hodnoty kapacity.

Výstup integrátoru pozvolna stoupá, dokud opět nedosáhne prahového napětí na neinvertujícím vstupu komparátoru.

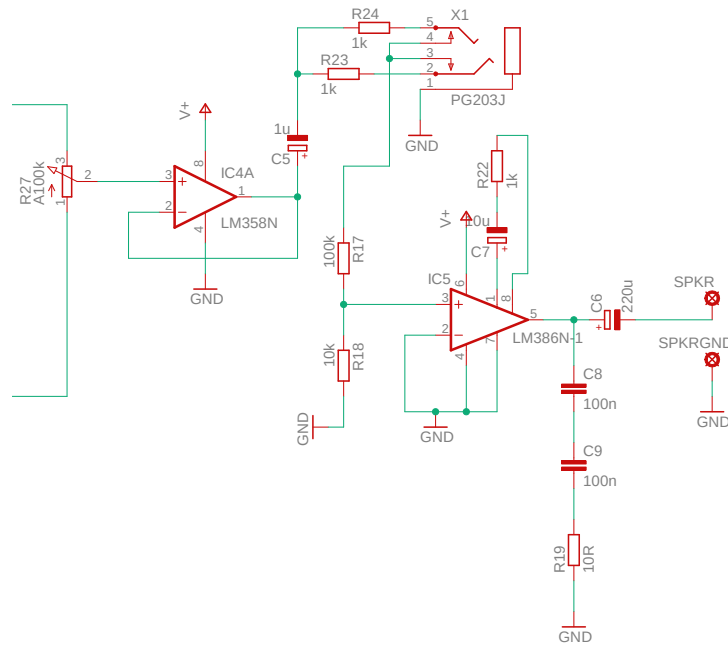


Obr. 2.8: Napětím řízený oscilátor generující pravouhly signál.

Čas vybíjení kondenzátoru lze měnit úpravou odporu na R13. Změny hodnot tohoto odporu budou mít vliv na výslednou střídu signálu; čím vyšší hodnota odporu na R13, tím delší bude část periody s vrchní hladinou. V tomto návrhu je dělicí poměr 68:100 (tj. střída 68%). Asymetrie signálu zapříčiní vznik lichých harmonických složek, které v obdélníkovém signálu se střídou 1:1 nejsou přítomny[1].



Obr. 2.9: Průběh výstupu integrátoru, tj. vstupu komparátoru (trojúhelník) a výstupu komparátoru (obdélník).



Obr. 2.10: Koncový stupeň syntezátoru.

2.2.5 Výstupní blok

Z VCO signál směřuje do bufferu IC4A přes logaritmický 100 k Ω potenciometr – ovládání hlasitosti. Kondenzátorem C5 je oddělena DC složka signálu. Pro poslech výstupního signálu jsou dvě možnosti.

- Připojení 3,5 mm jacku do konektoru X1. Reprodukční bude odpojen.
- Uvolnění konektoru X1 vede signál do integrovaného audio zesilovače LM386, který je zapojen podle schématu v datasheetu[24]. Výstup zesilovače je připojen na integrovaný reproduktor.

2.3 Podoba nasimulované modulace

Jak již bylo uvedeno, záměrem bylo dosáhnout frekvenční modulace připojením výstupu modulačního signálu na vstup VCO.

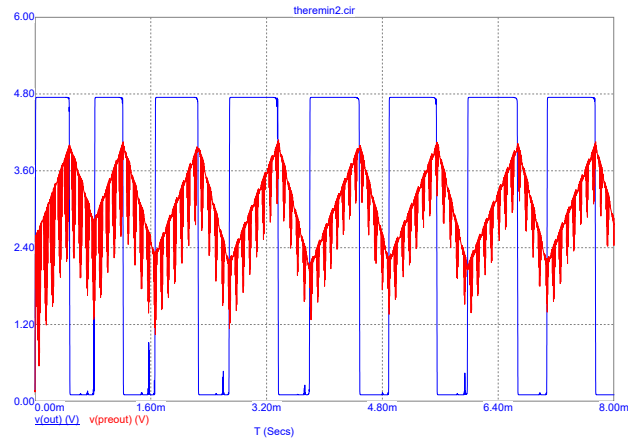
Simulace byla provedena v programu *Micro-Cap* a výsledky, které přinesla, nebyly na první pohled průkazné. Modulační signál, který byl připojen na vstup VCO, má zvyšovat a snižovat frekvenci v periodických intervalech, tak jako zobrazuje obrázek 1.1.

Modulovaný pravoúhlý signál na obrázku 2.11 jev FM vizuálně nepřipomíná.

Běžně při FM (tj. mimo zvukový význam), například v radiotechnice, disponuje kmitočtem nosného signálu mnohonásobně vyššího řádu než modulační signál. Radiové

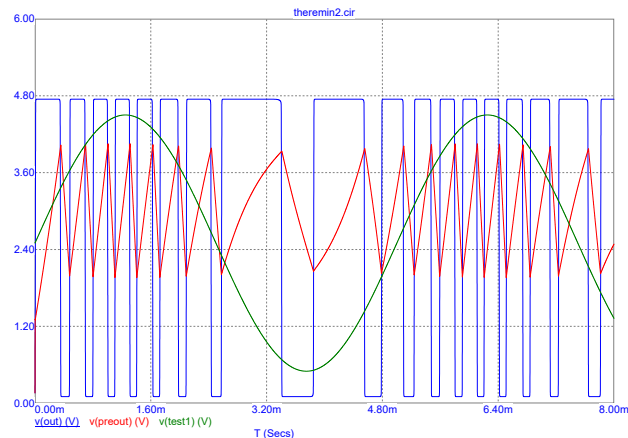
vysílání je vyjádřeno „zrychlováním a zpomalováním“ kmitání nosného signálu [5] [6].

V případě navrženého syntezátoru je tomu naopak. Frekvence modulátoru byla pro zmíněnou simulaci programem vypočtena na 10,3 kHz, zatímco kmitočet VCO nabývá hodnot do 1500 Hz. Vzhledem k faktu, že vysokofrekvenční signály modulátoru lze naladit pouze tak, aby jejich zázněje nabývaly tisíců Hertz (více v kapitole 2.4.1), bude mít vždy kmitočet modulačního signálu řádově vyšší hodnotu než nosná.



Obr. 2.11: Signál na výstupu integrátoru („trojúhelník“) a komparátoru (pravoúhloúhý) po připojení modulačního napětí.

Úspěšné grafické ověření funkčnosti VCO přineslo připojení harmonického signálu o frekvenci 200 Hz vygenerovaného simulačním softwarem (obr. 2.12).



Obr. 2.12: Pravoúhloúhý signál reaguje změnou délky periody na okamžitou hodnotu harmonického signálu.

Princip modulace v případě tohoto zařízení je následovný.

Náběžná hrana výstupního signálu IC3B je vybuzena v momentě, kdy se na invertujícím vstupu komparátoru objeví menší než spodní prahové napětí. Přítomnost modulačního signálu, který je přičten k trojúhelníkovému signálu integrátoru způsobuje, že je prahové hodnoty napětí dosaženo dříve, než by tomu bylo v jeho absenci.

Modulátor s periodou kmitů $97 \mu\text{s}$ ($f = 10\,309 \text{ Hz}$) je v grafu 2.11 reprezentován „výstřely“ z trojúhelníkového signálu integrátoru. Díky své vysoké frekvenci a amplitudě zapříčiní v každé periodě vybuzení náběžné hrany pravoúhlého signálu dříve, než by vybudila neovlivněná sestupná hrana trojúhelníku. Čas, ve kterém se tak stane, odpovídá času, ve kterém má trojúhelník o amplitudu modulátoru větší napětí, než je spodní práh a pak nejpozději o dobu ne delší než je jedna perioda modulačního signálu.

V tabulce 2.1 jsou uvedeny časové úseky mezi jednotlivými pulzy. Při takto vysoké frekvenci a zkreslenosti modulačního signálu se hodnoty jeví spíše jako náhodné.

Tab. 2.1: Tabulka frekvenčních výkyvů.

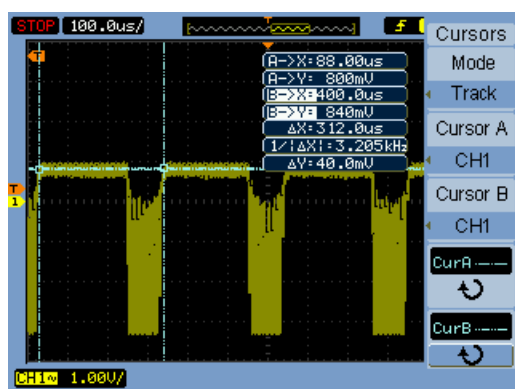
Pořadí periody	Čas [ms]	Frekvence [Hz]
1	0,746	1340
2	1,022	978
3	1,103	906
4	1,123	890
5	1,076	929
6	1,116	896
7	1,069	935

2.4 Realizace

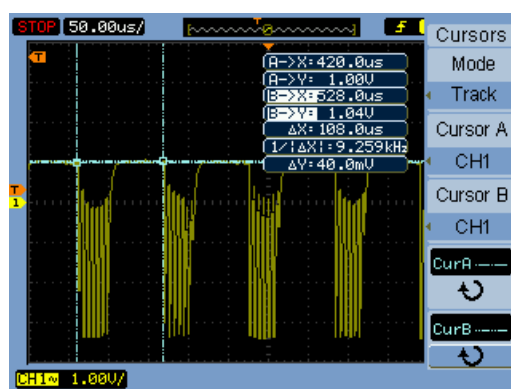
2.4.1 Oživení

Obvod byl sestaven sestaven na nepájivém poli drátovými součástkami určenými pro DPS dle schematu A.1. Napájení, výstup na jack 3,5 mm a dva potenciometry byly vypůjčeny z vývojového prostředí *Omsynth* firmy *Bastl Instruments*. Seznam součástek (v tabulce C) a fotografie osazeného nepájivého pole (obr. B.1) jsou v příloze.

Jako snímač prototypu byla použita nerezová tyč o průměru 8 mm a délce 50 cm. Po sepnutí spínače se aktivovalo napájecí napětí V+ a 5 V. Trimrem byl naladěn fixní oscilátor modulátoru, aby se frekvence rázů nacházela ve slyšitelném pásu. Osciloskop zobrazil kmitočet 3,2 kHz jako nejnižší možný, který lze na modulátoru prostřednictvím ladění fixního oscilátoru naladit (obr. 2.13). Při tomto nastavení trimru a ruce přiložené do těsné vzdálenosti ke snímači je kmitočet modulátoru 9,2 kHz (obr. 2.14).



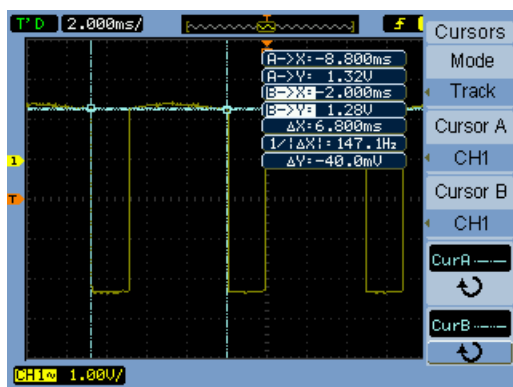
Obr. 2.13: Nejnižší možná frekvence modulátoru 3,2 kHz (ruka mimo aktivní pole snímače).



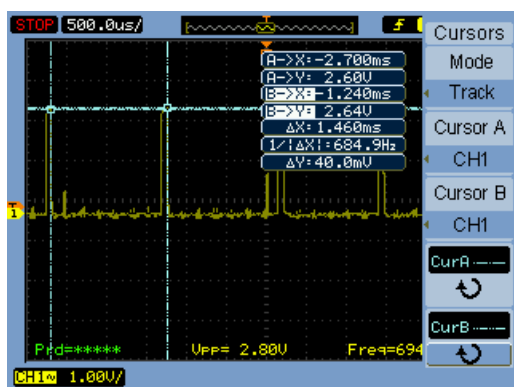
Obr. 2.14: Při stejném nastavení trimru a ruce v těsné blízkosti je frekvence modulátoru 9,2 kHz.

Bylo proměřeno také VCO při poloze potenciometru v 1/3 dráhy. Modulační signál prozatím nebyl přiveden na vstup. Výstupním signálem je obdélníkový signál o frekvenci 147 Hz a střídě 71 % (obr. 2.15).

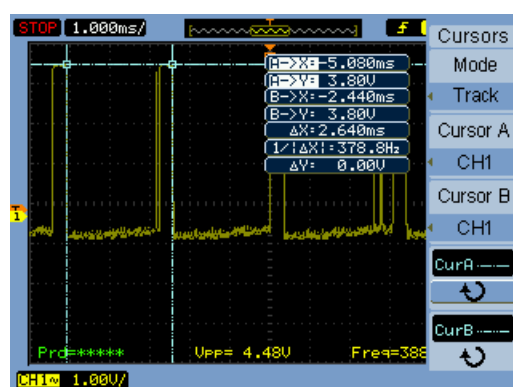
Po zapojení modulačního signálu byl zobrazen i celkový výstupní signál. Modulovaný signál se graficky jeví jako pulzní signál s malou střídou, frekvenční modulaci průběh nepřipomíná, ale jak bylo poznamenáno, jedná se o takový případ FM, ve kterém je vyšší kmitočet modulační než nosný. Bylo by mylné očekávat výstup, který by se podobal průběhu na obr. 2.12. Obrazovka osciloskopu zobrazuje stav při ruce v těsné blízkosti (obr. 2.17) a vzdálené ruce (obr. 2.16).



Obr. 2.15: Nosný signál.



Obr. 2.16: Modulovaný signál – ruka mimo aktivní pole snímače



Obr. 2.17: Modulovaný signál – ruka v těsné blízkosti snímače

Vsunutí konektoru jack 3,5 mm propojilo nástroj se zesilovačem a reproduktory. Začal se ozývat zvuk, který bude detailněji probádán v následující kapitole.

2.4.2 Reakce na ovládání a charakteristika zvuku

Největších zvukových možností lze dosáhnout v oblastech kolem střední polohy potenciometru určující frekvenci nosné vlny, zde se modulátor zvukově nejlépe uplatní. Čím více se ruka přibližuje ke snímači, tím větší je míra dekonstrukce zvuku. Nejvýraznější dopady na barvu jsou vyvolávány změnami vzdáleností za hranicí 1 cm. Četnost odchylek nosné frekvence se navyšuje, dynamicky se mění spektrální obsah – zvuk je obohacen o nové barvy.

Rychlé pohyby rukou v obou směrech vertikální osy snímače vytváří zbrklé modulační změny a nejzajímavější barvy. Když ruka není v pohybu, držený zvuk po chvíli začíná znít příliš monotónně.

Při nízkých frekvencích (kolem 50–100 Hz) nosného signálu se ovládání chová spíše náhodně a dochází k praskání a přerušování. Při vyšších frekvencích

(1000–1200 Hz), které jsou na konci dráhy potenciometru, má modulátor malé nebo žádné uplatnění. Celkový rozsah VCO je zhruba 4,5 oktávy. Z toho se na rozmezí 100–1000 Hz (3,3 okt.) modulační signál na nosném dobře uplatní, a v tomto pásmu se syntezátor chová předvídatelně.

Povaha zvuku, který vychází z nástroje, je non-tónová, výška tónu je spíše relativní. Spodní rejstříky jsou více zašuměné než ty vyšší. Zvuk je vydáván kontinuálně, jediná možnost jak pracovat s dynamikou, je otáčení hlasitostního potenciometru. Díky němu je možné zvuk zcela ztlumit, pohybem ruky přeladit modulační frekvenci a opětovným zvýšením hlasitosti odhalit zvuk jiné barvy. Další možnost ovládní je držení potenciometrů oběma rukama. Ruka, která ovládá parametr na potenciometru bližšímu ke snímači, může zároveň zasahovat do aktivního pole snímače, a tím ho přeladovat. Touto technikou je možné zároveň ladit jak základní frekvenci zvuku i její barvu danou modulací.

Nastavit trimr na vyšší hodnotu než na uvedenou v kapitole 2.4.1 nepřináší nové barvy ani jiné výhody, ale pouze snižuje rozsah dobře slyšitelných efektů modulace. Modulační signál, který dosahuje kmitočtů na vrchní hranici slyšitelného pásma (u mne kolem 16 kHz), vytváří „kvílivé“ kovové zvuky, u kterých nelze rozlišovat zajímavé barvy.

2.4.3 Možné hudební využití

Zmínka o tónové nenaladitelnosti v předchozím odstavci potvrzuje myšlenku, že by si nástroj těžce našel uplatnění v souborech populární hudby. Znemožňuje mu to právě špatná schopnost intonace a u mnohých hudebních žánrů by jeho zvuková barva mohla být považována za příliš „drsnou“.

Na obranu je nutno říci, že tento syntezátor nebyl navržen za účelem dosažení zvukových barev, které jsou známy z tradičních akustických nebo elektronických nástrojů. Kapitoly v teoretické části týkající se futurismu a konkrétní hudby byly zmíněny kvůli prvopočátečnímu nápadu, vytvořit nástroj, který by případně hledal uplatnění na polích alternativních žánrů hudby či v odvětvích, jejichž doménou je průzkum vnějších hranic zvukových možností.

V rámci pokračujícího myšlenkového proudu může být zvuk nástroje (ať už v syrové podobě anebo po průchodu efektoými procesory) použit pro vytváření různých „řinčivých“ efektů při aranžování existujících kompozic. Jeho charakter při některých nastaveních zvýrazňuje jisté formantové oblasti, díky kterým do určité míry zní jako zkreslený lidský řev.

S odkazem na kapitolu o konkrétní hudbě se nabízí varianta navzorkovat jej do paměti počítače, kde může být následně transponován, přehráván ve smyčkách a dále

procesován digitálními efekty, např. těmi, které využívají zpoždovací linky (chorus, delay, flanger, echo atp.).

Zajímavá je i představa interaktivní audiovizuální instalace, pro kterou by těchto nástrojů bylo zhotoveno více. Návštěvník výstavy, který by se pohyboval po expozici, by svými pohyby nevědomky měnil charakteristiky znějícího zvuku². Zvuková složka instalace by mohla být doplněna vizuály promítanými na zdi expoziční místnosti, které by v určitých algoritmech reagovaly na zvuk. K tomu by mohlo být využito programů např. *Max* nebo *Resolume*. Vzhledem k senzitivitě snímače by bylo zapotřebí udělat pro návštěvníky úzké cestičky, aby se dostali do aktivního pole snímače a zároveň zvětšit citlivost snímače zvětšením jeho plochy.

S nadsázkou lze říci, že nástroj půjde uplatnit všude, kde se nachází pohyb. A to ať již s vědomím pohybujícího se jedince či masy, nebo bez.

²Podobný koncept realizoval ve 30. letech Lev Těrmén. Pro svojí choť-tanečnici upravil theremin tak, že místo klasické podoby snímačů použil velkou desku, která se nacházela na zemi. Na desce tanečnický pohybem měnil svým celým tělem kapacitu v obvodu oscilátorů, čímž určoval výšku a dynamiku znějícího zvuku[29].

Závěr

V uplynulých částech bakalářské práce byl navrhnout a sestrojén experimentální elektronický analogový syntetizér. Byly popsány úvahy před počátkem návrhu, vysvětlen princip fungování z elektrotechnického hlediska, doplněn o potřebné výpočty a simulace. Po oživení zařízení bylo zobrazeny průběhy reálných signálů na osciloskopu a popsáno chování při různých situacích. Všechny uvedené simulace byly provedeny pouze z důvodu ověření technické funkcionality obvodu. V žádné fázi vývoje neproběhla snaha spojovat předpovídané tvary signálů v FM řetězci jiných syntezátorů, což by dopředu pomohlo odhalit hrubý rys budoucího zvukového charakteru nástroje.

Po odvolání na teze konkrétní hudby, které byly oporou tohoto projektu, by ani nebylo správné zvukové simulace provést – při tvůrčím procesu je nutno se odpoutat od myšlenky, kterou má zvuk na konci kreativní cesty zhmotnit. V případě, že zvukový výstup zkompletovaného nástroje není jeho strůjci vyhovující, nabízí se myšlenka, aby takových nástrojů bylo vyrobeno větší množství, a to ať už stejných s malými modifikacemi anebo projekt pojmout jinak od úplného začátku. Jednotlivé nástroje by po opuštění předchozích zkušeností, figurovaly jako izolovaní jedinci, jejichž zvuky by byly skládány do zcela nových kompozic konkrétní hudby.

Pro smysl této práce je celkový výstup syntetizéru (tj. vnitřní struktura, ovládání, charakter zvuku) shledán vyhovujícím. Jev frekvenční modulace byl z měření prokázán, a byť jsou frekvenční odchylky vlivem „nečistého“ modulačního signálu nepravidelné, jedná vzhledem k experimentální povaze projektu o žádoucí fenomén.

V poslední kapitole praktické části se nacházejí úvahy o jeho možném zapojení, ať už do alternativních hudebních scén anebo do zvukoelektronických badatelských kruhů.

Nástroj má i svá možná vylepšení a rozšíření.

Napájení

Bateriové napájení nezaručí vysokou hlasitost v případě využití zabudovaného reproduktoru. Pro dosažení vyšších hladin by bylo zapotřebí přidat vstup pro síťové napájení a dodat více proudu. Pro seriózní využití bude zařízení zapojeno do externího zesilovače, reproduktor slouží jen pro rychlé demonstrace zvuku.

Modulátor

Integrované Schmittovy obvody fungují stabilně a spolehlivě. Provedené výpočty se téměř shodují s frekvencí obou oscilátorů. Pokud by se podařilo dosáhnout velmi jemného ladění fixního oscilátoru, mohly by být uvažovány i nízké kmitočty rázů

(modulačního signálu), čímž by se otevřely nové zvukové možnosti, ale prozatím hodnotím rozsah 3–9 kHz jako dobrý výsledek.

Výstupní impedance tranzistorového zesilovače záměrně nebyla oštrována. Veškeré výkyvy, ke kterým může dojít jsou brány jako žádoucí.

VCO

Simulace napětím řízeného oscilátoru se shoduje se simulací. Nabízí se výměna rezistoru R13 za potenciometr, kterým by uživatel měnil šířku pulzu nosného signálu. Eventuálně by rezistor mohl být nahrazen elektronickým ovladačem (ovládaným např. LFO), který by měnil šířku pulzu v čase.

Potenciometr R26 by mohl být nahrazen klaviaturou se standardem 1V/oktáva, což by nástroji umožnilo muzikálnější využití než v podobě, v jaké se nachází nyní.

Další možná využití

Nejlákavější představa je možnost přidání více snímačů. Každý z nich by byl ovladačem pro různé parametry nově integrovaných modulů. Nejvíce se nabízí filtrační jednotka (např. dolní nebo pásmová propust), VCA nebo další různé efektové moduly. Proplétání ruky sítí snímačů by zaručilo simultánní modulaci všech přítomných parametrů.

Literatura

- [1] ADAMCZYK, Bogdan. *Spectra of Digital Clock Signals*. In: *Incompliance* [online]. March 31, 2017 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://incompliancemag.com/article/spectra-of-digital-clock-signals/>
- [2] *Amplitudová modulace* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://elnika.sweb.cz/radia/am.html>
- [3] BUSONI, Feruccio. *Návrh nové estetiky hudebního umění*. Přeložila Marie Rabová. *Rytmus*. 1940, **5**.
- [4] DICKIN, John. *How does a Theremin Pitch Antenna work?* In: *Dickin Electronics* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://waytoomuchtime.ca/how-pitch-antenna-works>
- [5] *Elprocus* [online]. *Frequency Modulation and Its Applications*. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/frequency-modulation-and-its-applications/>
- [6] *Federation of American Scientists*. In: *Military Analysis Network* [online]. Introduction to Naval Weapons Engineering: Frequency Modulation. 1998 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/FM.htm#fm>
- [7] FLAŠAR, Martin. *Poème électronique, 1958: Le Corbusier, E. Varèse, I. Xenakis* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2012 [cit. 2019-12-15]. ISBN 9788021059450. Dostupné z: <https://digilib.phil.muni.cz/handle/11222.digilib/124573>
- [8] GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: Část I - Elektromechanické nástroje*. Praha: Uvnitř, 2007. ISBN 978-80-239-8446-0.
- [9] GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: Část II - Elektronické nástroje*. Praha: Uvnitř, 2008. ISBN 978-80-239-8447-7.
- [10] HAYKIN, Simon. *Communication Systems*. 4th Ed. New York: John Wiley, 2001. ISBN 0-471-17869-1.
- [11] MIEKISCH, Jiří. *Přenos a zpracování informací*. Opava, 2012. [cit. 2019-12-15]. Dostupné také z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablon/AUT_IV/VY_32_INOVACE_E-15-03.pdf

- [12] MITCHELL, Robin. *DIY Synth Series: Part 1 — The Exponential VCO*. In: *All About Circuits* [online]. 8 August 2016 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/diy-synth-series-vco/>
- [13] MOOG, Robert. *Build the EM Theremin*. In: *Electronic Musician* [online]. February 1996, , 10 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.cs.nmsu.edu/~rth/EMTheremin.pdf>
- [14] NOŽKA, Marek. *Amplitudová modulace* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: https://mamut.spseol.cz/nozka/psk/018-amplitudova_modulace/
- [15] *ON Semiconductor* [online]. 2N3903, 2N3904 General Purpose Transistors. 2012 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/2N3903-D.PDF>
- [16] RUSSOLO, Luigi. *Umění hluku*. Miláno, 1913. [cit. 2019-12-15]. Dostupné také z: http://www.o-p-o.cz/links/Russolo,Luigi_Umeni_hluku_CZ.pdf
- [17] SAGGINI, Valerio. *Intonarumori*. In: *Thereminvox* [online]. February 21, 2004 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.thereminvox.com/article/articleview/116.html>
- [18] SCHAEFFER, Pierre. *Konkrétní hudba*. Praha: Supraphon, 1971.
- [19] STUDENÝ, Petr. *Balilla Pratella: Manifest futuristických hudebníků*. In: *HISVOICE* [online]. 19.4.2013 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://www.hisvoice.cz/balilla-pratella-manifest-futuristickyh-hudebniku/>
- [20] SYROVÝ, Václav. *Hudební zvuk*. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2009. ISBN 978-80-7331-161-2.
- [21] SYROVÝ, Václav. *Technické základy elektroakustické hudby*. Druhé přepracované vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1990.
- [22] TEOCHARISOVÁ, Vanda. *Sound design: Zvuková syntéza a tvůrčí programování zvuků v praxi*. Praha: Muzikus, 2009. ISBN 80-86253-53-4.
- [23] *Texas Instruments* [online]. CD40106B CMOS Hex Schmitt-Trigger Inverters. 2017 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd40106b.pdf>
- [24] *Texas Instruments* [online]. LM386 Low Voltage Audio Power Amplifier. 26 May 2017 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm386.pdf?ts=1590336280807>

- [25] *Texas Instruments* [online]. LM340, LM340A and LM7805 Family Wide VIN 1.5-A Fixed Voltage Regulators. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7800.pdf>
- [26] *Telotone* [online]. Metody zvukové syntézy: JAK VYTVOŘIT ZVUK? 26/06/2009 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/metody-zvukove-syntezy>
- [27] TICHÝ, Milan. *Elektronika* [online]. Praha: Univerzita Karlova, 1998. [cit. 2019-12-15]. Dostupné také z: <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/index2.html>
- [28] WILSON, Ray. *Make: Analog Synthesizers*. Sebastopol, USA: Maker Media, 2013. ISBN 978-1-449-34522-8.
- [29] *120 Years of Electronic Music* [online]. The ‘Terpsitone’ Leon Termen, USA & Russia, 1932. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <http://120years.net/the-terpsitoneleon-termenusaussr1930/>

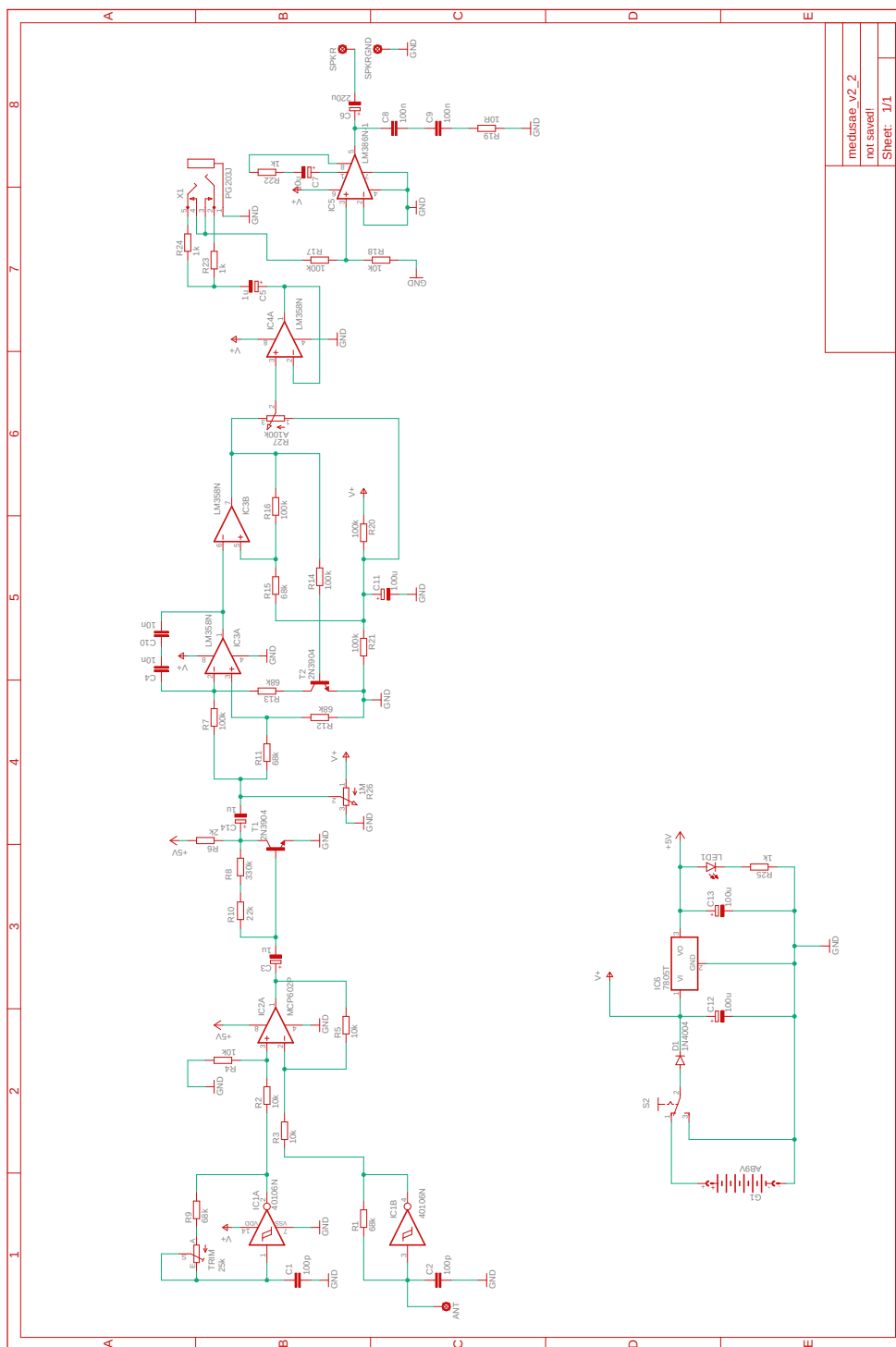
Seznam symbolů, veličin a zkratk

ADC	Analog to digital conversion – analogově-digitální převod
DPS	Deska plošných spojů
AM	Amplitudová modulace
DAC	Digital to analog conversion – digitálně-analogový převod
FM	Frekvenční modulace
LFO	Low frequency oscillator – nízkofrekvenční oscilátor
PCB	Printed circuit board – deska plošných spojů
ROM	Read only memory – nepřepisatelná paměť
VCA	Voltage-controlled amplifier – napětím řízený zesilovač
VCF	Voltage-controlled filter – napětím řízený filtr
VCO	Voltage-controlled oscillator – napětím řízený oscilátor

Seznam příloh

A	Kompletní schéma	55
B	Breadboard	57
C	Seznam součástek	59
D	DPS	61
	D.1 Návrh	61
	D.2 Před osazením	61
	D.3 Po osazení	62

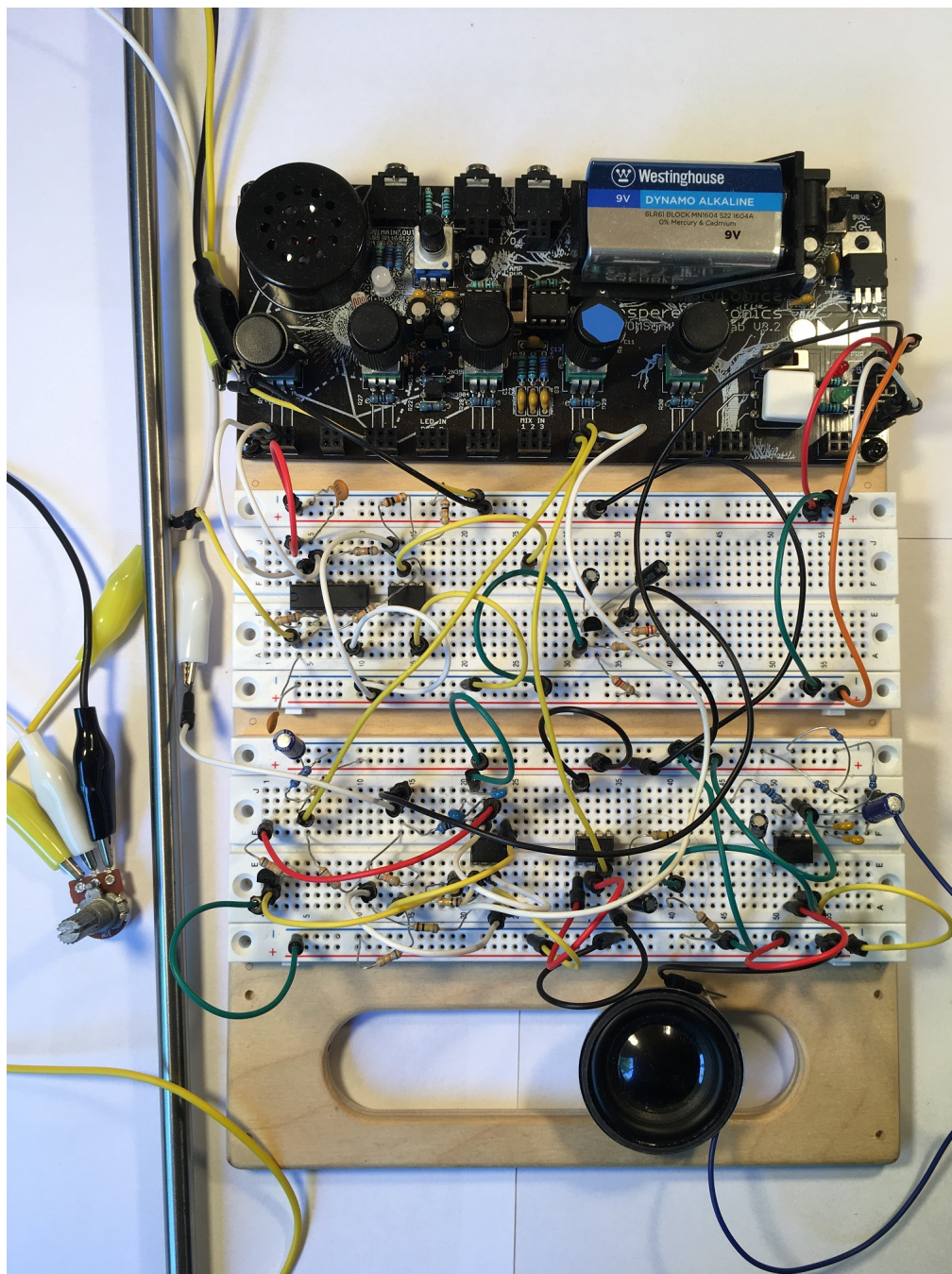
A Kompletní schéma



meduse v2.2
not saved!
Sheet: 1/1

Obr. A.1: Kompletní schéma zařízení.

B Breadboard



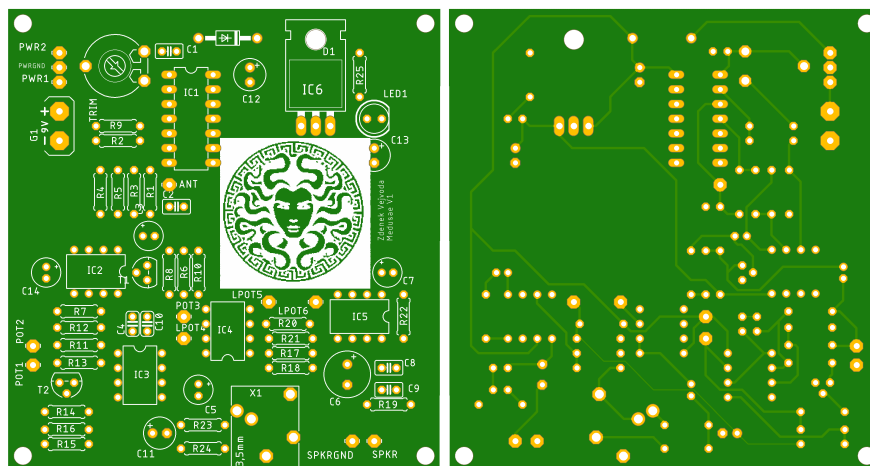
Obr. B.1: Obvod složený na nepájivém poli vývojového prostředí *Bastl Instruments OMSynth*.

C Seznam součástek

Součástka	Specifikace	Jednotka	Pouzdro	Množství
Rezistor	10	Ω	0204	1
Rezistor	1k	Ω	0207	4
Rezistor	2k	Ω	0207	1
Rezistor	10k	Ω	0207	4
Rezistor	22k	Ω	0207	1
Rezistor	68k	Ω	0207	6
Rezistor	100k	Ω	0207	6
Rezistor	330k	Ω	0207	1
Trimr	25k	Ω	PT 10-L	1
Log. potenciometr	A100k	Ω	PC1621N	1
Lin. potenciometr	B1M	Ω	PC1621N	1
Keramický kondenzátor	100p	F	C025-025X050	2
Keramický kondenzátor	10n	F	C025-024X044	2
Keramický kondenzátor	100n	F	C025-025X050	2
Elektrolytický kondenzátor	1 μ	F	E2-5	3
Elektrolytický kondenzátor	10 μ	F	E2-5	1
Elektrolytický kondenzátor	100 μ	F	E2,5-6	3
Elektrolytický kondenzátor	220 μ	F	E3,5-8	1
Dioda	1N4001	–	DO41-10	1
LED	–	–	LED5MM	1
Stabilizátor napětí 5 V	LM7805	–	TO220H	1
Integrovaný obvod	CD40106	–	DIL14	1
Integrovaný obvod	LM358	–	DIL8	2
Integrovaný obvod	LM386	–	DIL8	1
Integrovaný obvod	MCP602	–	DIL8	1
Tranzistor	2N3904	–	TO92	2
Kapacitní snímač	–	–	–	1
Baterie	9	V	–	1
Jack stereo	3,5	mm	PG203J	1
Reproduktor	8, 4	Ω , W	-	1
Držák baterie	–	–	–	1

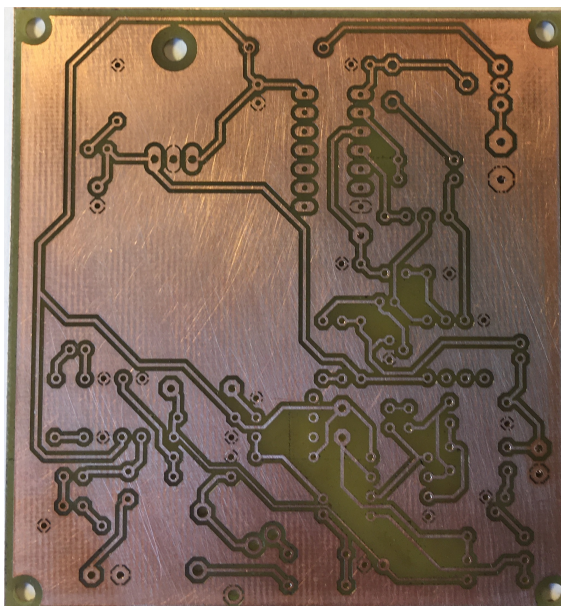
D DPS

D.1 Návrh



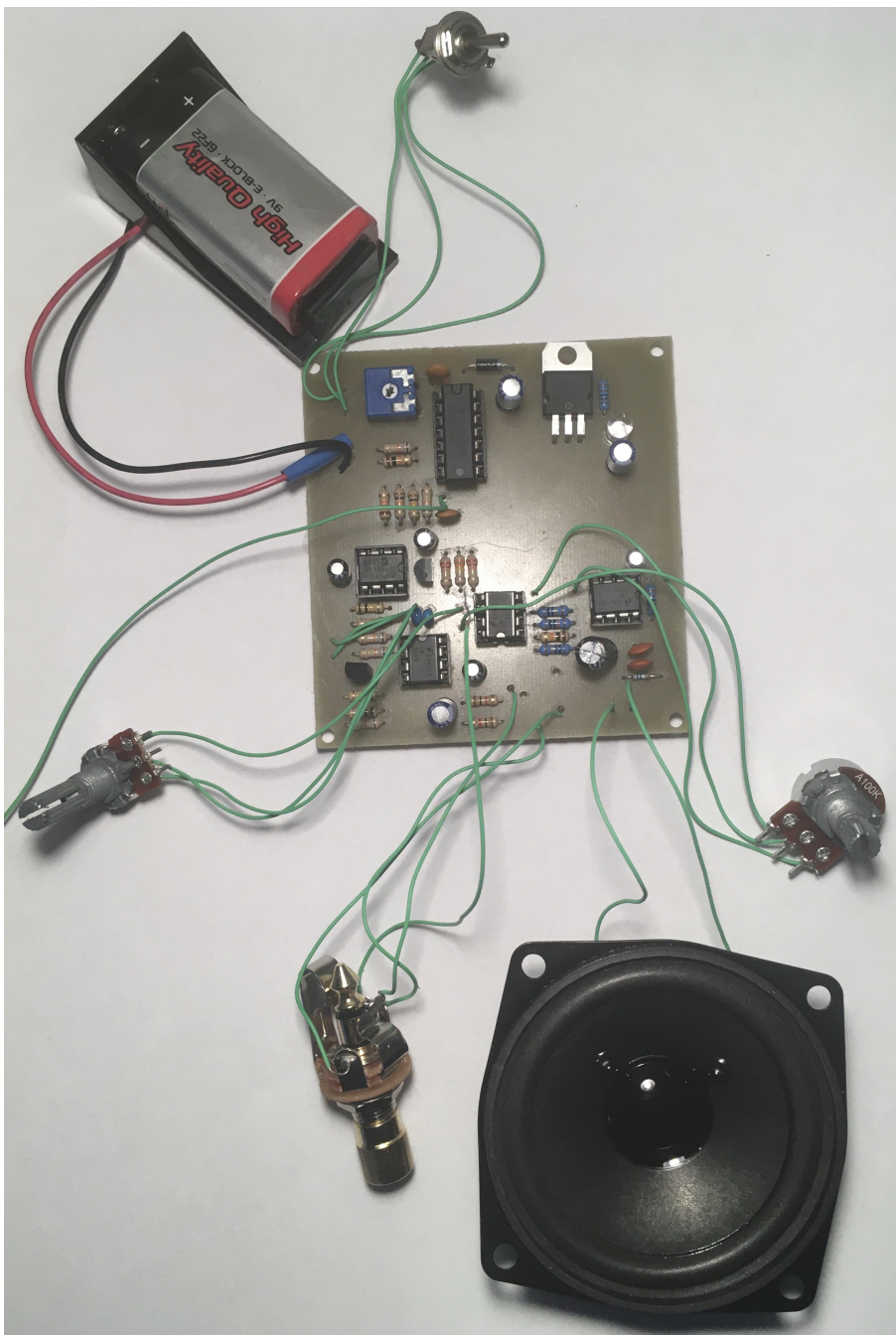
Obr. D.1: Návrh desky plošných spojů.

D.2 Před osazením



Obr. D.2: Zhotovená deska plošných spojů před osazením.

D.3 Po osazení



Obr. D.3: Zhotovená deska plošných spojů po osazení.