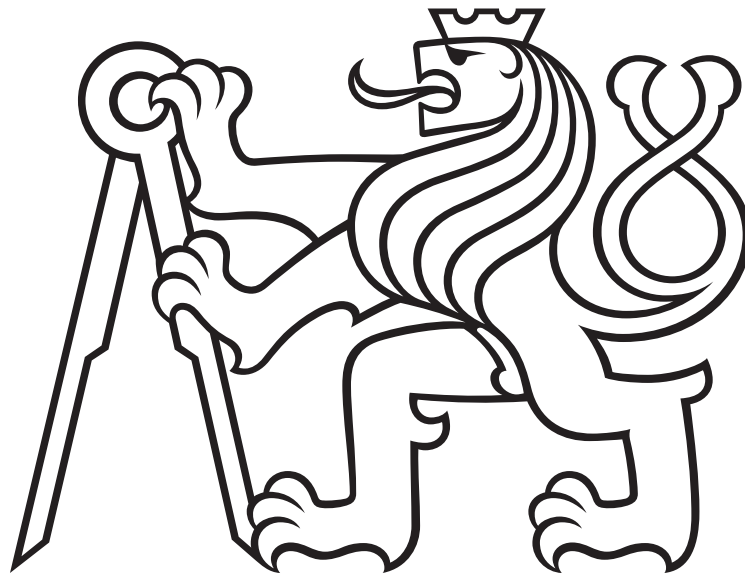


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky



Modulární hudební syntezátor

Modular Sound Synthesizer

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: David Tupý
Studijní program: Elektronika a komunikace
Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.
Rok: 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tupý** Jméno: **David** Osobní číslo: **483908**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Modulární hudební syntezátor

Název bakalářské práce anglicky:

Modular Sound Synthesizer

Pokyny pro vypracování:

Navrhnete a implementujete hudební syntezátor zvuku doplněný o sekvencér. Sekvencér bude založen na vhodném mikrokontroléru (např. z rodiny STM32F4). Zvuková část bude obsahovat následující moduly: VCO (voltage-controlled oscillator), VCA (voltage-controlled amplifier), LFO (low-frequency oscillator), VCF (voltage-controlled filter) a generátor šumu. Hudební nástroj bude možné ovládat pomocí standardu MIDI.

Seznam doporučené literatury:

- [1] WILSON, Ray. Make: Analog Synthesizers: Make Electronic Sounds the Synth-DIY Way. Maker Media, Inc., 2013.
- [2] EDSTROM, Brent. Arduino for Musicians: A Complete Guide to Arduino and Teensy Microcontrollers. Oxford University Press, 2016.
- [3] CANN, Simon. How to Make a Noise: A Comprehensive Guide to Synthesizer Programming. Simon Cann, 2007.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D., katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Josef Dobeš, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 20.5.2021

.....
autor

Poděkování

Rád bych především poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D. za odborné rady, vedení práce a velikou ochotu. Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. za konzultaci a výrobu desky plošného spoje. Nakonec také děkuji Ing. Václavu Navrátilovi, Ph.D. za 3D tisk krabičky, ve které je celý nástroj umístěn.

David Tupý

Abstrakt

Práce obsahuje pohled do světa modulárních syntezátorů. Zabývá se zejména návrhem a implementací hudebního syntezátoru doplněného o sekvencer. Konkrétně jde o tyto moduly: VCO, VCA, LFO, VCF a generátor šumu. Navrženy jsou tak, aby je bylo vzájemně možné propojovat a využít v různých kombinacích. VCO generuje obdélníkový signál o frekvencích 240 Hz – 1600 Hz a LFO generuje sinusový průběh o frekvenci 4 Hz – 27 Hz. Jako středobod práce posloužilo Nucleo-F334R8, které zastalo roli mikrokontroléru zejména pro sekvencer a ovládání pomocí standardu MIDI. V rámci implementace byl daný hudební nástroj postaven, otestován a byly změřeny výsledné průběhy na osciloskopu.

Klíčová slova

Hudební syntezátor, napětím řízený oscilátor, napětím řízený filtr, nízkofrekvenční oscilátor, generátor šumu, napětím řízený zesilovač, sekvencer, MIDI

Abstract

This thesis contains a view into the world of modular synthesizers. It deals mainly with the design and implementation of a music synthesizer, including a sequencer. Specifically, these modules were designed and implemented: VCO, VCA, LFO, VCF, noise generator. These modules can be used in combinations and connections. VCO generates a rectangular wave with frequencies of 240 Hz – 1600 Hz, and LFO generates a sinusoidal wave with frequencies of 4 Hz – 27 Hz. As a center of the thesis is used Nucleo-F334R8, which acts as a microcontroller mainly for sequencer and MIDI standard. As a part of the implementation, a musical instrument was built, tested, and final waves were measured on an oscilloscope.

Keywords

Sound Synthesizer, Voltage Controlled Oscillator, Voltage Controlled Filter, Low Frequency Oscillator, Noise Generator, Voltage Controlled Amplifier, Sequencer, MIDI

Obsah

Seznam obrázků	xi
Seznam zkratek	xiii
Úvod	1
1 Modulární syntezátory	3
1.1 Historie	3
1.1.1 Začátky	3
1.1.2 Moog	4
1.1.3 Buchla	4
1.1.4 ARP	5
1.1.5 Ostatní	6
1.2 Eurorack	6
1.3 Typy zvukové syntézy	7
1.3.1 Aditivní syntéza	7
1.3.2 Subtraktivní syntéza	7
2 Vyroběný nástroj	9
2.1 Schéma	9
2.1.1 VCO	10
2.1.2 LFO	10
2.1.3 Generátor šumu	10
2.1.4 VCF	11
2.1.5 VCA	11
2.1.6 Sekvencer	11
2.1.7 MIDI	11
2.1.8 Reproduktor	11
2.2 Kód	11
3 Bloky	13
3.1 VCO	13
3.1.1 Druhy vln	13
3.2 LFO	14
3.3 VCF	14
3.3.1 Typy filtrů	15
3.4 VCA	15
3.5 Generátor šumu	16
3.5.1 Druhy šumů	17

3.6	MIDI	17
3.7	Sekvencer	18
4	Návrh	19
4.1	VCO	19
4.1.1	Naladění	21
4.2	LFO	21
4.2.1	Oscilátor s Wienovým článkem	21
4.2.2	Výsledný návrh	23
4.3	VCF	24
4.4	VCA	25
4.5	Generátor šumu	25
4.6	Reproduktor a audio zesilovač	26
5	Implementace a naměřené průběhy	29
5.1	VCO	29
5.2	LFO	30
5.3	Generátor šumu	30
5.4	VCF	31
5.5	VCA	33
6	Závěr	35
	Literatura	37
A	Tabulka pro naladění VCO	40
B	DPS	42

Seznam obrázků

1.1	Těremin od firmy Moog [3]	3
1.2	Minimoog model D [6]	4
1.3	Buchla 100 series [7]	5
1.4	ARP 2500 [8]	5
1.5	Eurorack [12]	6
2.1	Čelní panel výrobku	9
2.2	Schéma výrobku	10
2.3	Blokový diagram fungování kódu	12
3.1	Sinusová vlna	13
3.2	Obdélníková vlna	13
3.3	Trojúhelníková vlna	14
3.4	Pilová vlna	14
3.5	Dolní propust	15
3.6	Horní propust	15
3.7	Pásmová propust	15
3.8	Pásmová zádrž	15
3.9	ADSR obálka	16
4.1	Astabilní klopný obvod z obvodu 555	19
4.2	Průběhy napětí od nenulového času na výstupu a na kondenzátoru	20
4.3	Realizace VCO pomocí obvodu 555	21
4.4	Wienův článek	22
4.5	LFO – Oscilátor s Wienovým článkem	22
4.6	Výsledné zapojení LFO	23
4.7	RC článek	24
4.8	VCF – dolní propust	24
4.9	VCA s vaktrolem	25
4.10	Generátor bílého šumu	26
4.11	Audio zesilovač	27
5.1	VCO na frekvenci 1,37 kHz	29
5.2	LFO na frekvenci 4 Hz	30
5.3	Bílý šum	31
5.4	LFO na 4 Hz, VCF a VCO	32
5.5	LFO na 27 Hz, VCF a VCO	32
5.6	LFO na 4 Hz, VCF a šum	33
5.7	LFO, VCA a VCO	33

5.8	LFO, VCA a VCO s rychlejším náběhem	34
5.9	LFO, VCA a šum	34
B.1	Deska plošného spoje	42

Seznam zkratek

- CV** – Control Voltage (kontrolní napětí)
- DPS** – deska plošných spojů
- EG** – Envelope Generator (generátor obálky)
- IN** – Input (vstup)
- LSB** – Least Significant Bit (nejméně významný bit)
- MIDI** – Musical Instruments Digital Interface (digitální rozhraní hudebních nástrojů)
- MSB** – Most Significant Bit (nejvýznamnější bit)
- OUT** – Output (výstup)
- OZ** – operační zesilovač
- VCA** – Voltage Controlled Amplifier (napětím řízený zesilovač)
- VCF** – Voltage Controlled Filter (napětím řízený filtr)
- VCO** – Voltage Controlled Oscillator (napětím řízený oscilátor)
- LFO** – Low Frequency Oscillator (nízkofrekvenční oscilátor)

Úvod

Zvukové podněty jsou všude kolem nás. Stále častěji se však vyskytují ty tvořené elektronicky – zvukovou syntézou. Této syntézy se samozřejmě využívá i v modulárních hudebních syntezátorech, kde hraje primární roli při tvorbě elektronického zvuku.

Modulární hudební syntezátory se hojně využívají již několik desítek let a stále se těší velké popularitě. Cílem této práce je navrhnout a sestavit použitelný syntezátor, který bude možné použít při výuce některých předmětů na FEL ČVUT v Praze a využít ho pro potřeby nově vznikajícího kabinetu elektronické hudby. Dále je produkt koncipován tak, aby si jednotlivé moduly mohl kdokoli postavit s několika málo součástkami a nepájivým polem podobně jako jiné komerčně dostupné varianty.

V první části se práce nejprve věnuje základnímu vhledu do modulárních syntezátorů. Popisuje stručnou historii se zaměřením na pány Mooga a Buchlu. Především je zde popsáno, jak elektronické nástroje začínaly a jak se vyvíjely až k dnešním podobám včetně standardu Eurorack. Dále jsou popsány nejdůležitější typy zvukových syntéz, které v historii sehrály nesmazatelnou roli.

V druhé kapitole se čtenáři seznámí s vyrobeným produktem. Je zde uvedeno mimo jiné schéma celého zapojení a je popsáno, jak s nástrojem pracovat a jaké jsou jeho možnosti. Toto je provedeno jak pro moduly, tak i pro sekvencer, MIDI ovládání nebo integrovaný reproduktor.

V kapitole Bloky je možno nahlédnout na základní principy a funkce jednotlivých modulů a bloků včetně nejtypičtějším použití. V následující části o návrhu jsou jednotlivé moduly navrženy, aby splňovaly jejich základní funkce a nebyly náročné na výrobu a finance. Jsou zde popsána konkrétní schémata a hodnoty součástek. V poslední kapitole o implementaci jsou k vidění naměřené průběhy z osciloskopu pro většinu použitelných kombinací modulů. Nachází se zde také odkazy, na kterých je možné si průběhy poslechnout.

Kapitola 1

Modulární syntezátory

Zvukový syntezátor je hudební nástroj, který používá elektroniku k vytváření zvuku. Modulární syntezátor je specifický svým rozdělením do jednotlivých bloků a modulů, kde každý zastává jinou funkci [1]. Modularita dodává uživateli možnost sestavit si svůj hudební nástroj dle vlastních představ a požadavků [2].

Tato kapitola nejprve popíše historii a vznik modulárních syntezátorů. Poté se zaměří na standard Eurorack, do kterého se modulární syntezátory vyvinuly a také budou představeny dva typy nejpoužívanějších zvukových syntéz.

1.1 Historie

V rámci historie budou popsány začátky modulárních syntezátorů, budou uvedeny důležité modely a lidé, kteří se na nich podíleli a zasloužili se o rozvoj tohoto odvětví do podoby, kterou známe dnes.

1.1.1 Začátky

První pokusy o zvukový syntezátor přišly již v 70. letech 19. století, kdy Elisha Gray využil stávajícího telegrafu a přidáním oscilátorů vytvořil hudební telegraf. Poté v roce 1896 Thaddeus Cahill vytvořil telharmonium, které se využívalo ke koncertování přes



Obrázek 1.1: Těremin od firmy Moog [3]

telegraf. Telharmonium zabíralo celou místnost a vytvářelo zvuk pomocí elektromechanického systému. Na podobném základu byly později v roce 1929 postaveny první Hammondovy varhany. Velké popularitě se také během 20. let 20. století začal těšit těremin – hudební nástroj (na obrázku 1.1), který lze ovládat rukama bez dotyku. [4]

Myšlenka modulárního syntezátoru se objevila poprvé v padesátých letech 20. století v severní Americe na dvou místech současně – na východním a západním pobřeží. Bob Moog a Don Buchla měl každý trochu jiný přístup, ale jedno měli společné, a to plně přizpůsobitelné prostředí. Zatímco Buchla šel se svým „západním“ konceptem cestou přidávání vyšších harmonických k základní vlně (aditivní syntéza), Moog se svým „východním“ konceptem používal filtrování k vytvoření chtěného zvuku (subtraktivní syntéza). Oba tyto pohledy vedly k podobě dnešních syntezátorů. [2]

1.1.2 Moog

Dr. Robert Arthur (Bob) Moog studoval elektroniku na univerzitě v Cornellu. Již během studia si postavil svůj těremin. Moog sice nebyl hudebník, ale těremin ho značně limitoval a chtěl vytvořit něco více univerzálního. Moogovy prvotní výrobky mezi lety 1967 a 1972 byly velice objemné a byly umístěny do velkých dřevěných skříní. Bohužel se velmi zahřívaly a nevydržely dlouho naladěné. [4]

Jako první přišel s možností řídit signály pomocí CV (kontrolní napětí). Nechal si patentovat designy VCO, VCA a VCF. Napětím řízené moduly skýtaly značné výhody, a to především to, že byly závislé pouze na jedné fyzikální veličině – napětí. [4]

Mezi první komerčně úspěšné modulární syntezátory patřil v roce 1970 představený Minimoog model D na obrázku 1.2. Velkou výhodou byla jeho přenosnost, což jeho předchůdci často zabírající celou místnost neumožňovali. Syntezátor obsahoval 3 oscilátory, generátor šumu, dva generátory obálek, filtr a klaviaturu s rozsahem 44 tónů. [5]



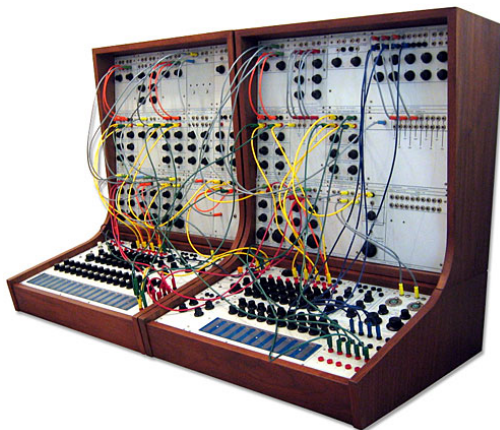
Obrázek 1.2: Minimoog model D [6]

1.1.3 Buchla

Donald Buchla byl student fyziky, psychologie a hudby na Kalifornské univerzitě v Berkley. Dostal grant 500 USD, aby vytvořil hudební nástroj, který by byl schopný

produkovat elektronickou hudbu bez nutnosti stříhat a spojovat páskové smyčky [2]

Buchlův stěžejní nástroj na obrázku 1.3 nesl název Buchla 100 series a byl postaven během 60. let 20. století. Přestože jeho syntezátory vypadaly podobně jako ty Moogovy, jeho metoda syntézy byla zcela odlišná. Kombinoval různé oscilátory a filtry. Vyhýbal se klaviatuře. Nikdy nebyl tak rozšířený a populární jako Moog a jeho nástroje. Toto zařízení mělo oddělené moduly, které bylo možné spolu různě pospojovat. Obsahovalo až 25 modulů včetně VCO, filtrů atd. [2]



Obrázek 1.3: Buchla 100 series [7]

1.1.4 ARP

Alan R. Pearlman již vedl firmu zabývající se elektronikou, když se rozhodl, že se začne zabývat elektronickými nástroji. V roce 1970 vytvořil první produkt s názvem ARP 2500 na obrázku 1.4. Tento nástroj měl dokonce lepší kvalitu oscilátorů než Moog a zůstal déle naladěný. Ve středu nástroje se nacházely moduly a po stranách se našly matice přepínačů, které sloužily k rychlejšímu přepojování bez nutnosti použití mnoha kabelů. Velkou nevýhodou ale bylo, že signály měly přesahy do ostatních sekcí. [4] [2]



Obrázek 1.4: ARP 2500 [8]

Dalšími úspěšnými modely byly ARP 2600, jehož koncept později převzala firma Korg, nebo ARP Odyssey, což byl přímý konkurent Minimoogu. [5]

1.1.5 Ostatní

Mezi další důležité výrobce v historii patřilo Britské EMS – Electronic Music Studios. Jejich stěžejním nástrojem bylo Voltage-controlled Studio 3, které ještě předcházelo Minimoogu a využívalo mimo jiné matici pinů a joystick [5]. Dále v Americe působili výrobci Oberheim, který začínal s digitálním sekvencem, kterým šlo ovládat Minimoog nebo ARP 2600, a Sequential, který se už podle názvu také primárně zabýval sekvencery [4]. Dalšími důležitými výrobci byli nepochybně Yamaha, Korg nebo Roland, kteří působili v Japonsku [4].

1.2 Eurorack

Eurorack je standardizovaný formát pro modulární syntezátory vyvinutý v roce 1996 Dieterem Doepflem a jeho firmou Doepfer Musikelektronik. Před tímto formátem měl každý výrobce svůj technický set a výrobky jednotlivých firem spolu nebyly kompatibilní. Tento formát určuje především rozměry, které činí na výšku takzvané 3 „rack units“ – 3U (133,4 mm) a na šířku se měří v tzv. „horizontal pitch“ – hp, kde se 1 hp = 5,08 mm. Dále také standardizuje velikosti napájení a kontrolních signálů. [9] [10]

Dle [11] jednotlivé moduly vyrábí přes 460 různých firem a tyto moduly je možné mezi sebou libovolně skládat a propojovat. To je značná výhoda, každý si pak může poskládat syntezátor jaký potřebuje a bude mu vyhovovat. Samotné moduly se dále skládají do racku, který má nejčastěji na výšku rozměry 3U, 6U nebo 9U. Moduly se poté mezi sebou propojují 3,5mm mono Jack kabely. Jednu osazenou Eurorack skříň je možné vidět na obrázku 1.5.

Moduly se spojují v racku skrz 10 nebo 16pinové kabely, v kterých se nalézají +12 V, -12 V, +5 V, GND nebo CV signály.

Firmy, které vytváří moduly, jsou např. Doepfer, Analogie systems, Moog nebo také české Bastl Instruments [11].



Obrázek 1.5: Eurorack [12]

1.3 Typy zvukové syntézy

Zvuková syntéza je proces, jehož výsledkem je předvídatelný či nepředvídatelný elektronický zvuk. V praxi se rozlišují dva výsledky, kterých se v syntéze chce dosáhnout. Buď co nejdříve napodobit již existující zvuk, nebo vytvořit nějaký zcela nový a originální. [13]

Mezi nejzákladnější metody patří aditivní neboli součtová a subtraktivní neboli rozdílová syntéza.

1.3.1 Aditivní syntéza

V literatuře [14] je uvedeno: „Koncept aditivní syntézy je spojen s Fourierovým theoremem, který tvrdí, že každý signál může být rozložen do sumy sinusových vln různých amplitud a fází.“ Tato metoda tedy zahrnuje generování velkého množství sinusových vln a jejich následné skládání a kombinování k vytvoření nových zvuků [15].

Z počátku byla tato metoda velice nákladná, což se časem změnilo [16]. Dnes se nachází převážně na digitálních syntezátorech, které často ani neobsahují filtry [4].

1.3.2 Subtraktivní syntéza

Subtraktivní syntéza pracuje s opačným principem než syntéza aditivní. Místo sčítání sinusovek je generován zvuk, který má zpravidla vysoký obsah harmonických složek [16]. Využívá se proto převážně průběhů jako jsou obdélník, pila nebo trojúhelník. Poté se signál upravuje filtry, které zvýrazní nebo potlačí určité části spektra [15]. S touto syntézou pracuje většina analogových syntezátorů [4].

Kapitola 2

Vyrobený nástroj



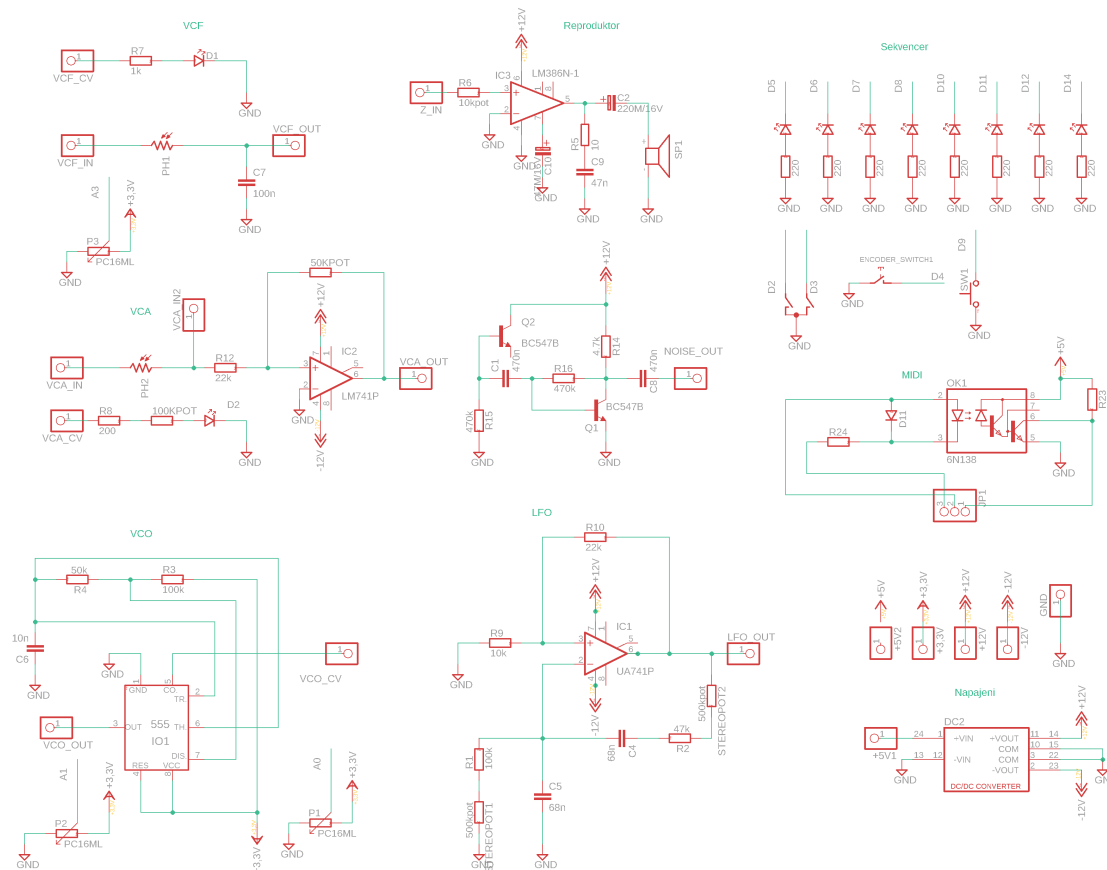
Obrázek 2.1: Čelní panel výrobku

Základem celého syntezátoru je Nucleo-FR334R8. Napájení je řešeno skrz USB. Nucleo poté zvládne vytvářet 3,3 V a 5 V. Napájení ± 12 V je řešeno DC–DC převodníkem SIM5-0512D z 5 V na ± 12 V. Při napájení skrz USB byl u +5 V pozorován vysoký šum přenesený na výstup VCO. V rámci této práce je pro toto napájení provizorně použit laboratorní zdroj, se kterým už vše fungovalo očekávaně.

Nástroj je umístěn v krabičce, v níž se nachází deska plošného spoje a Nucleo. Čelní panel je osazen zbylými komponenty. Její návrh na 3D tisk byl vytvořen v programu Fusion 360. Plošný spoj byl navržen v programu Eagle a obsahuje všechny moduly včetně napájecího měniče.

2.1 Schéma

Na obrázku 2.2 je uvedeno celkové schéma zapojení. Některé uvedené moduly je možné používat samostatně a některé je nutné použít v kombinaci s jinými. Jako prvo-
votní zdroj zvuku lze použít buď VCO nebo generátor šumu, ten lze dále modifikovat



Obrázek 2.2: Schéma výrobku

ve VCF nebo VCA. Jako CV pro tyto dva moduly je možné použít LFO. Pro regulaci hlasitosti skrz VCF je možné jako CV použít výstup k tomu určený. Vstupy a výstupy jsou propojovány skrz 3,5 mm Jack mono konektory.

2.1.1 VCO

VCO je ovládáno dvěma potenciometry. Prvním jde nastavit frekvence hrubě (coarse) a druhým jemně (fine). Jeho rozsah je 240 Hz – 1600 Hz ve tvaru obdélníkového signálu. Napájeno je 3,3 V z Nuclea. Má jeden výstupní konektor OUT.

2.1.2 LFO

Na LFO lze měnit aktuální frekvenci sinusového signálu v rozsahu 4 Hz – 27 Hz jedním potenciometrem. Zdrojem tohoto modulu je ± 12 V. Nachází se zde jeden výstupní konektor OUT.

2.1.3 Generátor šumu

Generátor šumu vytváří bílý šum. Napájení ze zdroje +12 V. Jeden výstup OUT.

2.1.4 VCF

Na VCF se nachází vstup zvukového signálu IN, výstup filtrovaného signálu OUT a jeden vstup pro CV. Dále filtr obsahuje generátor CV s výstupem, který lze použít pro regulaci mezní frekvence.

2.1.5 VCA

Do VCA může vstoupit zvukový signál přes vstup IN, dále může vstoupit nebo vystoupit na IN'. Dále se zde nachází vstup CV, který ovlivňuje, co se se signálem stane mezi IN a IN'. Výstup OUT lze následně regulovat potenciometrem, který mění zisk zesilovače, jehož napájení je ± 12 V.

2.1.6 Sekvencer

Základem sekvenceru je rotační enkodér, po jehož zmáčknutí se přepne do režimu výběru pořadí tónu (celkem osm pozic). Rozsvítí se první LED a otočením lze přepínat pozici. Po dalším kliknutí lze vybrat tón pro danou pozici (výběr z osmi tónů), otočením opět přepínat. Stiskem se opět potvrdí. Zmáčknutím tlačítka lze pak uloženou sekvenci kdykoliv přehrát, po jejím přehrání se režim vrátí zpět do generování zvuku.

2.1.7 MIDI

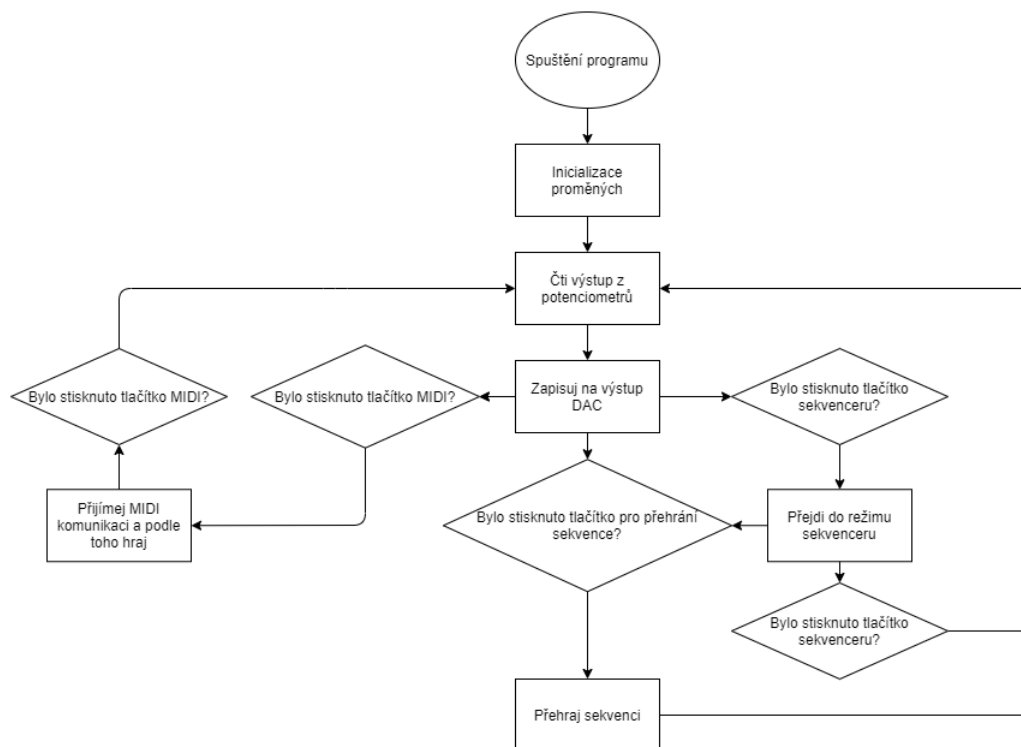
Po zapojení kabelu do MIDI lze stiskem tlačítka přejít do módu, kdy lze udávat tóny přes externí zařízení. Opětovným stiskem tlačítka se tento mód zase vypne.

2.1.8 Reproduktor

Když se zapojí 3,5mm Jack kabel do IN začne se generovaný signál přehrávat v integrovaném 3W reproduktoru. Potenciometrem lze měnit hlasitost.

2.2 Kód

Kód pro Nucleo byl napsán v online ide mbed. Znázornění základního fungování kódu je zobrazeno pomocí blokového diagramu na následujícím obrázku.



Obrázek 2.3: Blokový diagram fungování kódu

Kapitola 3

Bloky

Obsahem této kapitoly jsou principy a funkce jednotlivých bloků a modulů, ze kterých je ve výsledku postaven celý chtěný modulární syntezátor.

3.1 VCO

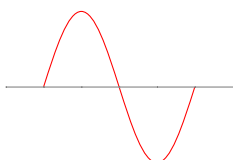
Napětím řízené oscilátory – VCO jsou běžně zahrnované v celé řadě aplikací, např. v generátorech funkcí nebo smyčkách fázového závěsu [17]. Zároveň je to hlavní modul pro vytváření zvuku všech analogových syntezátorů.

VCO je elektronický obvod, který konstantně generuje vlnu o určité frekvenci, amplitudě a tvaru [4]. Nejběžněji sinusovou, obdélníkovou nebo trojúhelníkovou, jak bude popsáno v následující sekci 3.1.1. Zvuk zde vzniká v podobě elektrických vln, které následně vedou do ostatních modulů, kde je signál filtrován, modulován nebo jinak upraven do finální podoby. Dokud signál nedosáhne reproduktoru, tak se vše odehrává pouze ve formě napětí a proudů [16]. Většinou oscilátory dokážou generovat průběhy od 50 Hz do 16000 Hz, což odpovídá rozsahu přes 7 oktáv jako na běžném pianu [4].

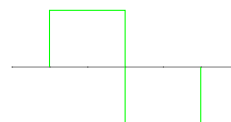
3.1.1 Druhy vln

Zvuk je postupné podélné vlnění vzduchem, při kterém dochází k tlakovým vzruchům. Při poslechu rozlišujeme několik základních druhů vln, které budou popsány následovně.

Nezákladnější a nejpřirozenější vlnou je **vlna sinusová** na obrázku 3.1. Sinusovka na rozdíl od ostatních vln neobsahuje žádné harmonické frekvence. To ji dělá jedním z nejpodstatnějších stavebních kamenů ve světě zvukové syntézy. Sinusovka má čistý a vyhlazený zvuk podobný zvuku flétny. [16] [18]



Obrázek 3.1: Sinusová vlna

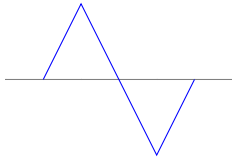


Obrázek 3.2: Obdélníková vlna

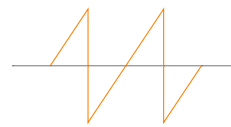
Obdélníková vlna na obrázku 3.2 je jednou z nejjednodušších na generování. Má pouze dva diskrétní stavy HIGH a LOW (zapnuto a vypnuto). K vytvoření zvuku stačí

dostatečně rychle střídát tyto dva stavy. Obdélníková vlna je tvořena pouze z lichých harmonických frekvencí (3, 5, 7 atd.). Má charakteristicky dutý zvuk podobný klarinetu. [16] [18]

Další velmi rozšířenou vlnou je **vlna trojúhelníková** vyobrazená na obrázku 3.3. Vychází z kombinace sinusovky a obdélníku. Tvar má podobný sinusovce, ale jako obdélník obsahuje pouze liché harmonické frekvence, ovšem v jiném poměru. Výsledný zvuk je podobný obdélníku, ale není tak čistý. [16] [18]



Obrázek 3.3: Trojúhelníková vlna



Obrázek 3.4: Pilová vlna

Pilová vlna na obrázku 3.4 dává jasný, lehce bzučivě zabarvený tón, který je bohatý jak na sudé, tak na liché harmonické frekvence. Díky této bohatosti je vhodné ji použít k subtraktivní syntéze. [16] [18]

Pulsní vlna je jistou variací obdélníku. Má ty samé dva stavy HIGH a LOW, ale liší se rozdílností ve střídě, která zde nenabývá 50 %. Změnou střídý se významně zvyšuje počet harmonických frekvencí a výsledný zvuk je zabarvenější. [16] [18]

3.2 LFO

LFO, neboli nízkofrekvenční oscilátor je v mnoha ohledech stejný jako VCO. Liší se však v rychlosti kmitání, která je pomalejší a nachází se v neslyšitelném spektru zvuku. Jeho frekvence se typicky pohybuje od desítek mHz do přibližně 20 Hz [18]. Dalším rozdílem je využití. Nepoužívá se jako zdroj zvuku, nýbrž jako modifikátor zvuku v jiných modulech – vytváří kontrolní napětí [16].

LFO podobně jako VCO může také generovat různé druhy vln. Díky nim se tvoří efekty jako vibrato¹ a tremolo². Pokud sinusová vlna modifikuje VCA, vzniká tremolo. Pokud modifikuje filtr, vytváří efekt vibrata. Obdélníkovým průběhem může tvořit trylky. [16] [4]

3.3 VCF

Napětím řízený filtr je nejzákladnější obvod, kterým lze kontrolovat průběh zvuku. Je to jeden z nejoblíbenějších modulů, především díky jeho schopnosti tvarovat signál [18]. Podle Friedmana [16] VCF není nic jiného, než pouze elektrický obvod, který dokáže blokovat určitou část signálu vygenerovaného oscilátorem.

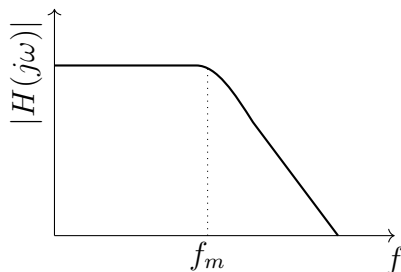
Filtry lze použít různými způsoby. Jednou možností je třeba regulace hlasitosti [15]. Filtr je základním prvkem pro subtraktivní syntézu, jelikož může odstraňovat vyšší harmonické frekvence a tím měnit výslednou barvu tónu [18].

¹Efekt, při kterém se cyklicky mění frekvence (výška tónu) v závislosti na čase [19].

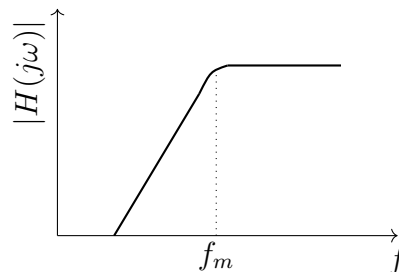
²Efekt, který působí jako manuální zesilování a zeslabování zvuku – mění se velikost amplitudy v závislosti na čase [19].

3.3.1 Typy filtrů

Vyskytuje se několik nejpoužívanějších typů filtru. Základním filtrem je **dolní propust** na obrázku 3.5, která zadržuje frekvence nad mezní frekvencí a propouští všechny pod. V nejkrajnějším případě může zamezit zvuku, aby prošel úplně [4].



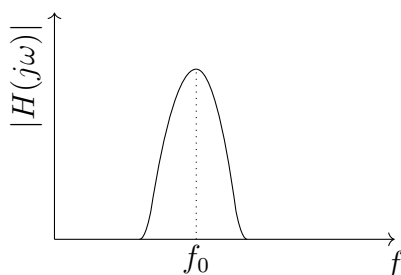
Obrázek 3.5: Dolní propust



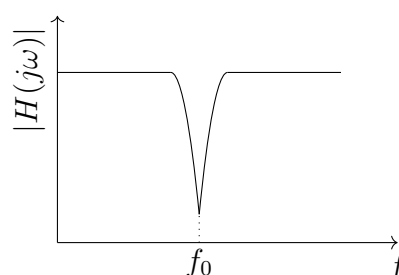
Obrázek 3.6: Horní propust

Horní propust na obrázku 3.6 funguje přesně opačně. Zamezí prostup nižším frekvencím a propustí pouze frekvence nad mezním kmitočtem. Dají se tím například vyrušit nižší rušivé frekvence [15].

Pásmová propust na obrázku 3.7 je kombinací předchozích. Vyzdvihuje pouze nějakou frekvenci a ostatní utlumuje [18].



Obrázek 3.7: Pásmová propust



Obrázek 3.8: Pásmová zádrž

Posledním typem je **pásmová zádrž** na obrázku 3.8, která naopak od pásmové propusti zadržuje pouze určitou frekvenci a na ostatní nemá vliv.

Vodorovná osa na obrázcích reprezentuje frekvenci v Hz, kde se směrem doprava frekvence zvětšuje. Na vertikální ose je útlum přenosové funkce v dB. Místo, kde se přenosová funkce začíná lámat a poklesne o 3 dB, se nazývá mezní frekvence a značí se f_m . Frekvence f_0 je frekvence, která má být nejvíce potlačena, nebo jako jediná propuštěna. [20]

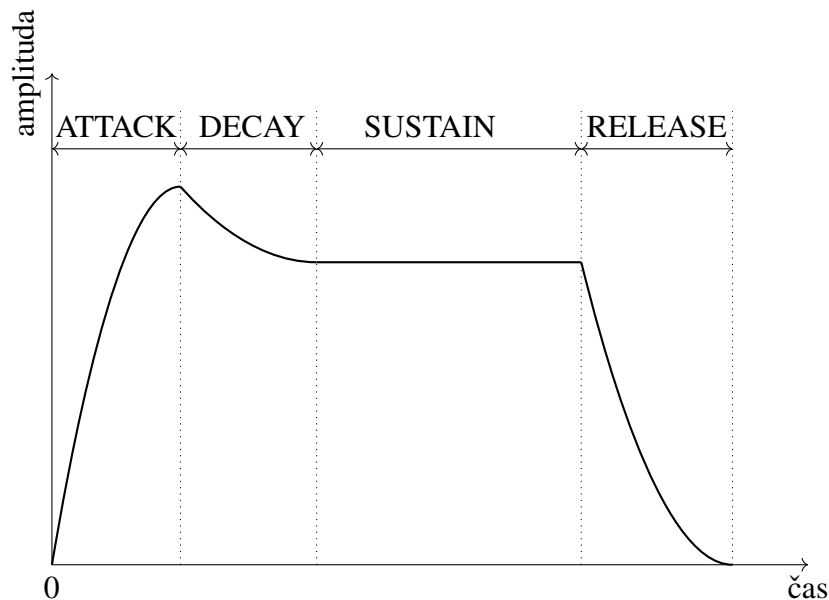
Mezní frekvence se běžně reguluje pomocí CV. Stejným způsobem se ovládá i další parametr filtrů, což je rezonance, díky které se zvedá úroveň signálu kolem mezní frekvence. [21]

3.4 VCA

Napětím řízený zesilovač je modul nebo elektronický obvod, který umožňuje regulovat hlasitost nebo množství zisku procházejícího audio signálu [1]. Tento zesilovač umožňuje, aby jeho parametry byly regulovány pomocí kontrolního napětí neboli CV.

Při nulovém kontrolním napětí je propouštěn signál v plné míře, kdežto při maximálním je signál utlumen úplně [21].

Jedním z typických zapojení je zapojení s generátorem obálky – EG. Pomocí této obálky lze napodobovat průběhy standardních hudebních nástrojů. Např. při tónu hracím smyčcem na housle se zvuk začíná rozeznávat postupně, kdežto u klavíru je nástup okamžitý. Typický průběh je vidět na následujícím obrázku 3.9. [16]



Obrázek 3.9: ADSR obálka

Nachází se zde 4 základní části. **Attack** fáze pokrývá úvod od stisku klávesy, rozeznění struny, či fouknutí vzduchu. Zvuk zde nabíhá z nulové amplitudy až do maximální. Zvuk z houslí má tento náběh mnohem delší než klavír, který maximální hlasitosti dosáhne velice rychle. **Decay** je druhá fáze, při které dochází k poklesu z maximální hlasitosti na sustain úroveň. Následuje **sustain** fáze, což je určitá úroveň, která se nemění, dokud je tón generován. Například tón zahráný na houslích smyčcem je v této fázi mnohem déle než tón zahráný na housle pizzicatem – v tomto případě je tato fáze naprosto zanedbatelná. Poslední **release** fáze nastává v okamžiku puštění klávesy, zastavení přítlaku vzduchu či skončení tahu smyčce. Dochází v ní k postupnému zeslabení amplitudy až na nulovou úroveň. [16] [15]

3.5 Generátor šumu

Podle [18] a [4] je generátor šumu modul, který v elektronické hudbě produkuje zvuky podobné zvukům moře, větru, bouřky či perkusních nástrojů (činel, bubny, atd.). Nebo je to také ten zvuk, který vydává rádio, když je rozladěné mezi stanicemi. Zní jako „ššššš“.

Ne všechny šumy jsou stejné. Dělí se na několik typů, které mají rozdílné rozložení výkonové frekvenční hustoty [21].

3.5.1 Druhy šumů

Bílý šum: Je náhodný signál, který obsahuje kompletní slyšitelné spektrum [22]. Analogicky je podobný bílému světlu, ve kterém se vyskytují všechny frekvence viditelného spektra [22]. Bílý šum má rovnoměrnou výkonovou spektrální hustotu [21].

Růžový šum: Je závislý na poměru $1/f$ [23]. Z této závislosti plyne, že jeho výkonová frekvenční hustota je lineární v logaritmickém měřítku s útlumem 3 dB na oktávu. Je možné ho vytvořit zařazením filtru (dolní propusti) právě s útlumem 3 dB na oktávu za generátor bílého šumu [18]. Růžový šum je lidskému uchu nejpřirozenější, protože se nejčastěji vyskytuje v přírodě, např. zvuk deště, zvuk lidského srdce nebo vítr [24].

Hnědý (červený) šum: Je závislý na poměru $1/f^2$, čili vlastně vzniká integrací bílého šumu. Jeho útlum je 6 dB na oktávu. [23]

Černý šum: Je „protizvuk“ k bílému šumu. Mohou se navzájem vyrušit. Je používán při popisu řady přírodních i nepřírodních katastrof, jako např. povodní, sucha nebo stagnace finančního odvětví. [23]

Dalšími typy šumů jsou například modrý, purpurový, šedý, oranžový nebo zelený. V elektrické hudbě se ale nejčastěji využívají šumy bílé a růžové.

3.6 MIDI

MIDI neboli digitální rozhraní hudebních nástrojů je standard, který je složen z fyzického propojení (hardware), kódování a způsobu přenosu dat (software) [25]. Jeho základem je, že nepřenáší zvuk samotný, ale pouze digitální informace o něm [26]. Díky tomuto standardu mezi sebou mohou komunikovat různá zařízení od různých výrobců.

Začátkem 80. let 20. století se rozšířila potřeba sjednotit komunikaci mezi jednotlivými hudebními elektronickými zařízeními. Do té doby spolu nebyla zařízení od různých výrobců kompatibilní. V roce 1981 byl na konferenci v New Yorku představen první návrh USI (Universal Synthesizer Interface). O ten však nebyl zájem, ale byly shromážděny připomínky od jednotlivých výrobců. V roce 1982 se výrobci opět sešli, sdělili si možná vylepšení a firma Roland navrhla jméno MIDI. Konečná verze byla představena o rok později, kdy už se začaly prodávat i první nástroje, které s tímto standardem pracovaly. [25]

MIDI komunikuje po sériové lince v jednom směru, která se velmi podobá standardu RS-232 [25]. Základem komunikace jsou vícebytové zprávy, kde se běžně jedna nazývá stavová a další jedna nebo dvě jsou tzv. datové [25]. Status byte je vždy prvním bytem zprávy a začíná vždy jedničkou. Díky tomu může v desítkové soustavě nabývat hodnot 128–255 [14]. V první polovině bytu je implementována akce (např. zapnutí či vypnutí noty) a v druhé půlce číslo kanálu, kterých může být až 16 [25]. Díky tomu, lze najednou řídit až 16 unikátních nástrojů.

Datové byty mají na pozici MSB vždy nulu, díky tomu mohou nabývat pouze hodnot 0–127 [14]. První datový byte běžně určuje číslo noty, druhý byte přenáší informaci o dynamice, tedy o rychlosti stisku klávesy [25]. Propojení se dělí na tři typy: IN, THRU, OUT. OUT se využívá k vysílání zpráv, IN k přijímání zpráv a THRU zprávy propouští skrz, tím vzniká zapojení Daisy chain [14]. Toto propojení je realizováno pomocí pětipinového DIN konektoru [25].

3.7 Sekvencer

Sekvencerem se rozumí zařízení, které vytváří kontrolní napětí v návaznosti s generátorem zvuku a dalšími moduly [20]. Sekvencer sám o sobě nic nezmůže, musí k němu být připojen nějaký syntezátor, u kterých velice často bývají sekvencery součástí [4]. V prvotní části se na sekvenceru navolí tóny. Obvykle jich bývá 8, 12 nebo 16 [4]. Sekvencer pak může dokola přehrávat třeba melodické motivy nebo basovou linku [20]. Takovéto několikatónové sekvence se nezdávkou vyskytují v moderních skladbách a písničkách [1].

Existují dva základní typy sekvenceru, a to analogový nebo digitální. Analogové se používaly historicky dřív a digitální mívají více možností a funkcí [20]. Při přehrávání sekvence je zpravidla její pozice znázorněna svítící diodou v matici diod [20]. Sekvencery dobře nahrazují hudebníkovy vytížené ruce. Nemusí se starat o opakující se hudební linku a dokáže díky tomu pokrýt více hlasů [27].

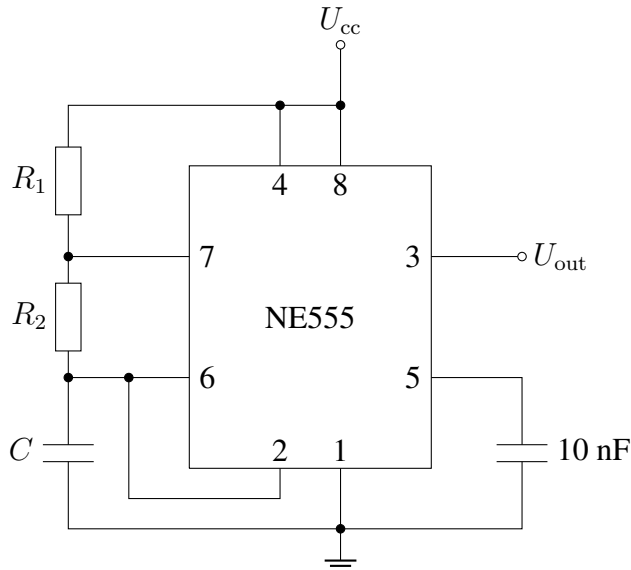
Kapitola 4

Návrh

Tato kapitola uvede schémata jednotlivých modulů a popíše postup, jakým probíhal jejich konkrétní návrh.

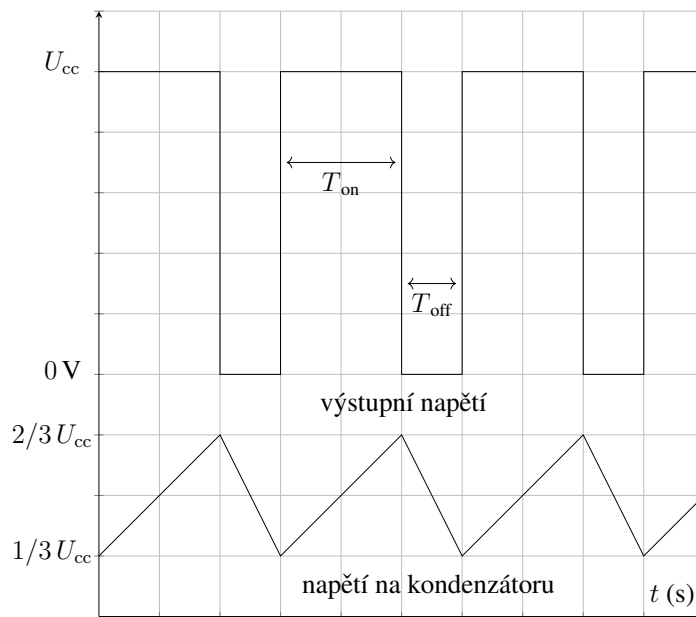
4.1 VCO

Při návrhu VCO se bude používat integrovaný obvod 555. Ten musí být zapojen tak, aby neměl žádný stabilní stav a osciloval ve tvaru trojúhelníku nebo obdélníku (v tomto případě). Takovéto zapojení se nazývá astabilní multivibrátor a schéma takového obvodu je uvedeno na obrázku 4.1. Toto zapojení má značné výhody – je nenáročné na součástky a levné na výrobu.



Obrázek 4.1: Astabilní klopný obvod z obvodu 555

Multivibrátor funguje díky nabíjení a vybíjení kondenzátoru C , jak je možno vidět na obrázku 4.2. Kondenzátor je plně vybit a při připojení napájecího napětí se nabíjí z nuly na $\frac{2}{3}U_{cc}$. Jakmile se na tuto hodnotu nabije, tak se vybíjí až do hodnoty $\frac{1}{3}U_{cc}$. Poté se pohybuje mezi těmito dvěma hodnotami. Vždy když se kondenzátor nabíjí, tak výstup je v sepnutém stavu (T_{on}), když se vybíjí, na výstupu je nula (T_{off}). Čas nabíjení a vybíjení je dán hodnotami rezistorů R_1 a R_2 a určuje také střídu signálu.



Obrázek 4.2: Průběhy napětí od nenulového času na výstupu a na kondenzátoru

V literatuře [28] jsou uvedeny následující vztahy potřebné pro návrh obvodu konkrétní frekvence a střídání. Vztah pro výslednou frekvenci

$$f = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2) \cdot C}, \quad (4.1)$$

vztah pro periodu

$$T = \frac{1}{f} = 0,694(R_1 + 2R_2) \cdot C, \quad (4.2)$$

vztah pro dobu nabíjení

$$T_{on} = 0,694(R_1 + 2R_2) \cdot C, \quad (4.3)$$

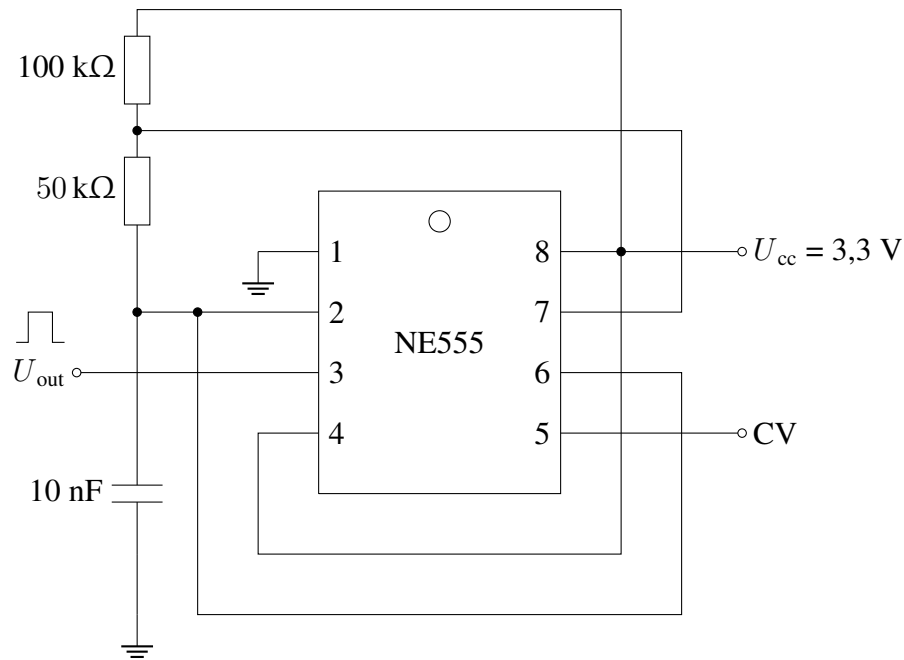
vztah pro dobu vybíjení

$$T_{off} = 0,694R_2 \cdot C, \quad (4.4)$$

vztah pro střídání

$$S = \frac{T_{on}}{T_{off}} \cdot 100 (\%). \quad (4.5)$$

Konkrétní realizace a zapojení je uvedeno na následujícím obrázku.



Obrázek 4.3: Realizace VCO pomocí obvodu 555

Podle vztahu 4.1 je výsledná základní frekvence rovna 720 Hz. Při aplikaci CV se výsledný rozsah bude pohybovat mezi 240 Hz a 1600 Hz, což je pro tuto realizaci dostatečný rozsah. Tyto hodnoty byly zjištěny simulací v programu LTSpice.

4.1.1 Naladění

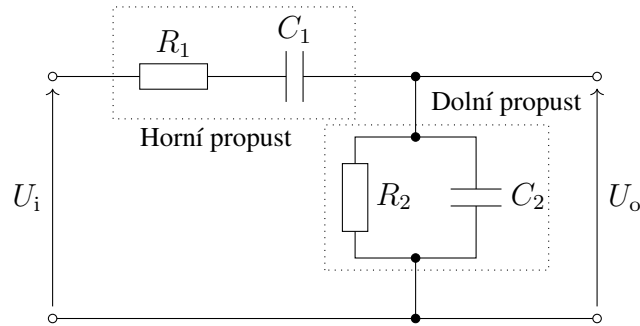
Ladění oscilátoru probíhalo pomocí aplikace do telefonu gStrings, což je jedna z mnoha aplikací, které fungují jako obyčejné ladičky. Takovéto ladičky jsou využívány v předních českých i světových symfonických i komorních tělesech. Potenciometrem bylo měněno CV a tím i výsledná frekvence, která se nastavila na požadovanou. Byly zaznamenány jak hodnoty kontrolního napětí, tak i daná úroveň mezi 0 a 1 kvůli následnému naprogramování Nuclea. K tomu byla použita sériová komunikace mezi Nucleem a počítačem. Výsledná tabulka je v příloze A.

4.2 LFO

Pro potřeby LFO se nejlépe jeví generovat sinusový tvar vlny. Tím poté lze pěkně vytvořit tremolo i vibrato. Této vlny lze dobře dosáhnout pomocí Wienova článku.

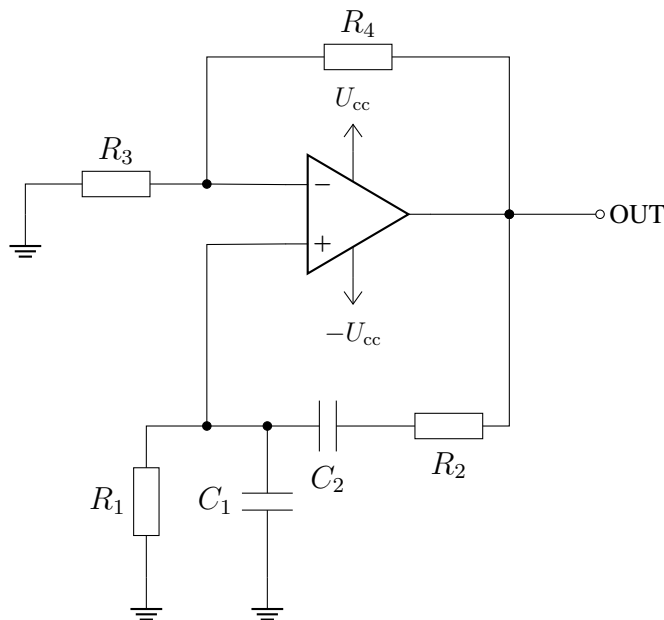
4.2.1 Oscilátor s Wienovým článkem

Wienův oscilátor využívá vlastností Wienova článku (na obrázku 4.4). Jeho velkou výhodou je, že ke generování sinusového průběhu nepotřebuje kromě napájecího zdroje žádný jiný zdroj signálu [29]. Wienův článek se skládá ze dvou RC článků zapojených dohromady. Sériový RC článek se chová jako horní propust a paralelní RC článek se chová jako dolní propust [30]. Dohromady tedy vytváří pásmovou propust.



Obrázek 4.4: Wienův článek

Oscilátor s Wienovým článkem na obrázku 4.5 v roce 1938 představil Bill Hewlett ve své závěrečné práci na Standfordské univerzitě v Palo Altu. Pro řízení amplitudy používal žárovku. [31]



Obrázek 4.5: LFO – Oscilátor s Wienovým článkem

Oscilátor vychází z jednoho operačního zesilovače, čtyř rezistorů a dvou kondenzátorů. Na oscilátor se dá také pohlížet jako na zesilovač kombinovaný s pásmovou propustí, která je zapojena jako kladná zpětná vazba. Zesilovací část je řešena obyčejným operačním zesilovačem se zápornou zpětnou vazbou, pro jehož napět'ový zisk platí vztah

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.6)$$

Z odvození podle Punčocháře a Mohylové [29] vychází přenosová funkce daného filtru $H = \frac{1}{3}$. V praxi kvůli tomu musí být zisk zesilovače podle vzorečku 4.6 větší nebo roven 3, aby obvod mohl začít oscilovat.

Podle [32] na rezonanční frekvenci bude reaktance R_2 a C_2 přesným násobkem R_1 a C_1 . Pokud jsou R_3 a R_4 nastaveny ve stejném poměru, může se psát

$$\omega^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}. \quad (4.7)$$

Pro tento obvod platí, že pokud $R_1 = R_2 = R$ a $C_1 = C_2 = C$ a nastaví se $R_4 = 2R_3$, bude pro výslednou frekvenci podle [33] platit vztah

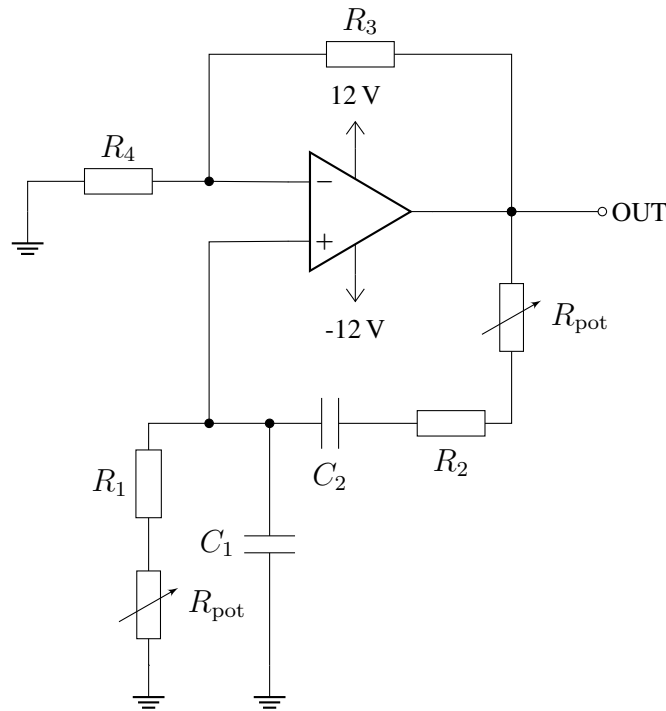
$$f = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (4.8)$$

Pokud nebude dodržena rovnost rezistorů a kondenzátorů, bude platit vztah

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \quad (4.9)$$

4.2.2 Výsledný návrh

Pro aplikaci LFO je ideální dosáhnout výsledné frekvence jednotek až nízkých desítek Hz. Pro toto použití je nutné udělat LFO s měnitelnou frekvencí. Aby se frekvence dala dobře měnit, bude zvoleno řešení se stereo-potenciometrem, který dokáže měnit odpor v obou větvích obvodu stejně.



Obrázek 4.6: Výsledné zapojení LFO

Frekvenci získáme tedy vztahem 4.9 a s navrženými hodnotami $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 68 \text{ nF}$ se dosáhne frekvence 34 Hz. Přidáním 500 k Ω stereo-potenciometru se frekvence může snížit až na 4 Hz podle následujícího vzorce. Čili pokud $C_1 = C_2 = C$, tak platí

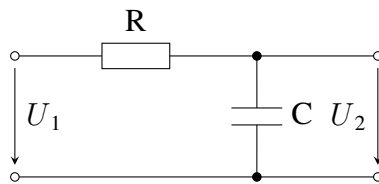
$$f = \frac{1}{2\pi C \sqrt{(R_1 + R_{\text{pot}})(R_2 + R_{\text{pot}})}}, \quad (4.10)$$

kde R_{pot} bude 500 k Ω potenciometr. Teoretický rozsah oscilátoru tedy vyjde 4–34 Hz.

Výsledné hodnoty prvků na obrázku 4.6 budou $R_3 = 22$ k Ω , $R_4 = 10$ k Ω , $R_1 = 100$ k Ω , $R_2 = 47$ k Ω , $C_1 = C_2 = 68$ nF, $R_{\text{pot}} = 500$ k Ω potenciometr.

4.3 VCF

V této části je potřeba dosáhnout návrhu filtru, konkrétně dolní propusti. Nejjednodušší dolní propust lze vytvořit z jednoduchého RC článku. Tento článek lze vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 4.7: RC článek

Přenosová funkce RC článku je odvozena následovně

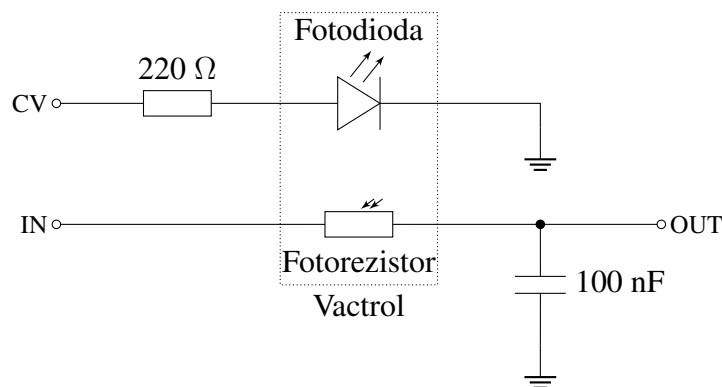
$$H(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{1}{1 + j\omega RC}, \quad (4.11)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + sRC}, \quad (4.12)$$

a byla znázorněna na obrázku 3.5 v kapitole 3. Mezní frekvence filtru f_m se vypočte vztahem

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (4.13)$$

Ve výsledném návrhu tedy bude figurovat dolní propust, kde mezní frekvenci půjde řídit pomocí CV. Toho bude dosaženo pomocí vactrolu³. Vactrol používal ve svých filtrech už i Buchla [34].



Obrázek 4.8: VCF – dolní propust

³Vactrol je odporový optický izolátor složený z fotodiody a fotorezistoru v jednom pouzdře [36].

Kontrolní napětí CV nejprve prochází rezistorem kvůli omezení proudu. Poté reguluje proud diodou, která je v jednom pouzdru s fotorezistorem. Ten je zapojen paralelně s kondenzátorem a dohromady tvoří RC článek, který působí jako dolní propust. Odpor fotorezistoru se mění podle toho, jak intenzivně emitující dioda svítí.

Použitý fotorezistor má tyto parametry: 1–2 k Ω na světle a 1 M Ω ve tmě. Dále, aby vyšla podle vztahu 4.13 vhodná mezní frekvence, je použit kondenzátor o kapacitě 100 nF. Mezní frekvence ve výsledku vychází od 1591 Hz (při plném osvětlení) do 1,59 Hz (při nulovém osvětlení).

4.4 VCA

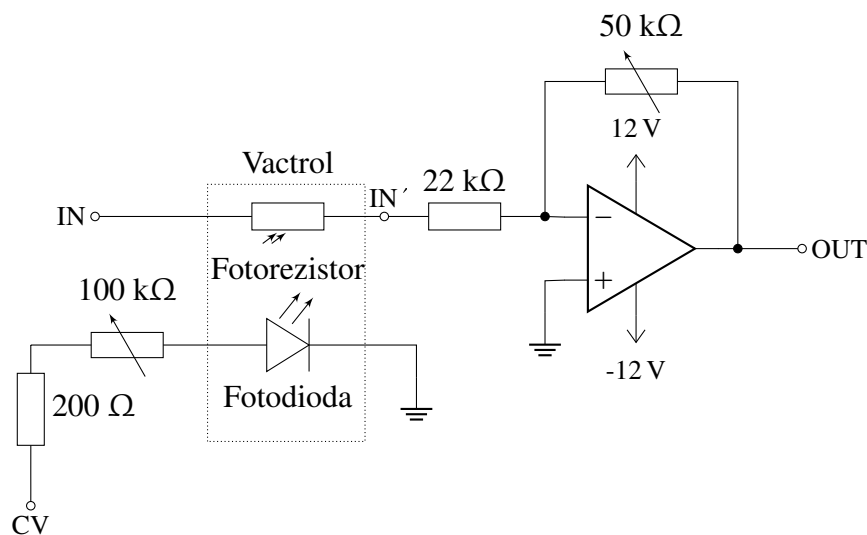
Při návrhu VCA bylo vycházeno z videa [35].

První část je tvořena pomocí vactrolu. Kontrolní napětí vstupuje nejprve do 220 Ω rezistoru z důvodu omezení proudu před vstupem do LED. Mezi tím je ještě 100k Ω potenciometr, kterým se určuje rychlost náběhu. Při minimální hodnotě potenciometru je náběh rychlejší než při vyšších hodnotách. Fotodioda mění odpor ve fotorezistoru, který pak konkrétně utlumuje signál, který do obvodu vstupuje.

Druhá část obvodu je operační zesilovač zapojený v invertujícím režimu s regulovatelným ziskem. Lze mu tedy zisk měnit podle vztahu

$$A_U = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (4.14)$$

Čili po dosazení 22 k Ω za R_2 a 0 Ω nebo 50 k Ω za R_1 vychází zisk A_U od nuly až do -2,27. Tímto lze výsledný zvuk dodatečně zesílit či zeslabit dle potřeby.

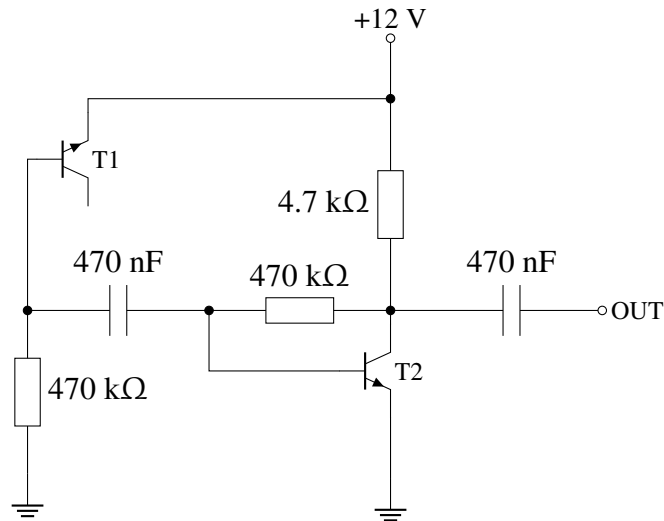


Obrázek 4.9: VCA s vaktrolem

4.5 Generátor šumu

Návrh generátoru bílého šumu vychází ze zapojení podle Wilsona [18], které bylo upraveno do finální podoby podle [37]. Toto schéma je uvedeno na obrázku 4.10. Za-

pojení je velice jednoduché a bylo velice populární v analogových syntezátorech v 70. letech minulého století [37].



Obrázek 4.10: Generátor bílého šumu

Ve většině obvodů bývá NPN tranzistor zapojen tak, že na bázi je větší napětí než na emitoru, což umožňuje průchod proudu mezi kolektorem a emitorem. Pro potřeby generování šumu se toto zapojení otočí. Na emitoru se musí nacházet vyšší napětí než na bázi a kolektor se nechá nezapojený [38]. Když se na takto zapojeném tranzistoru T_1 překročí průrazně napětí na přechodu emitor–báze, chová se tento přechod jako Zenerova dioda [18]. Nastává poté Zenerův průraz a vedlejším produktem tohoto průrazu je širokopásmový bílý šum [18]. Takto generovaný bílý šum má velice malou amplitudu a musí být následně zesílen [37].

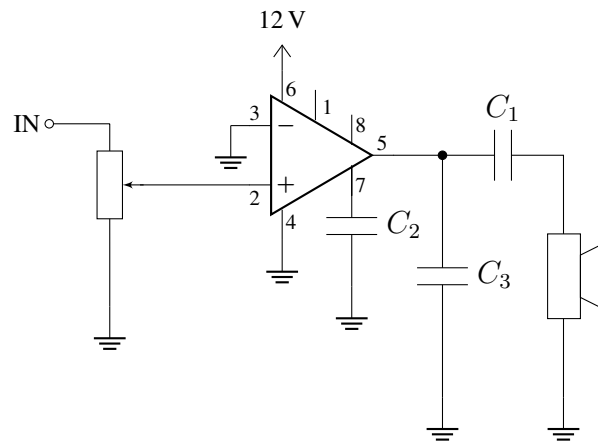
Pro potřebné zesílení se v tomto obvodu nachází tranzistor T_2 , který je zapojen jako jednoduchý zesilovač se společným emitorem. Takto zesílený signál už má dostatečnou amplitudu, aby mohl modul opustit a pokračovat do dalších částí syntezátoru [38]. Obvod zapojený tímto způsobem by měl tedy generovat širokospektrální bílý šum, jehož spektrum začíná od 100 Hz a pokračuje až do hodnot okolo 1000 kHz [37].

V tomto obvodu lze použít různé tranzistory, ale každý bude potřebovat jiné průrazné napětí a bude dávat jinak kvalitní šum [38]. Ve vyrobeném syntezátoru byly použity tranzistory BC547B, které vykazují podobné vlastnosti jako 2N3904, které používal Wilson [18], ale při realizaci nebyly dostupné. Dle subjektivního názoru tím kvalita šumu nebyla negativně ovlivněna.

4.6 Reproduktor a audio zesilovač

Před vpuštěním zvukového signálu do reproduktoru je signál potřeba nejprve výkonně zesílit. Jako nejlevnější a nejjednodušší varianta se jeví použití zvukového zesilovače LM386.

V datasheetu k tomuto zesilovači je uvedeno zapojení 4.11 [39]. Toto zapojení má různé možnosti a je možné ho trochu modifikovat. Napájení bude vzhledem k možností voleno +12 V. Hlasitost půjde regulovat 10kΩ potenciometrem s logaritmickým



Obrázek 4.11: Audio zesilovač

průběhem. Hodnoty kondenzátorů byly zvoleny následovně: $C_1 = 1 \text{ mF}$, $C_2 = 220 \text{ } \mu\text{F}$, $C_3 = 47 \text{ nF}$.

Kapitola 5

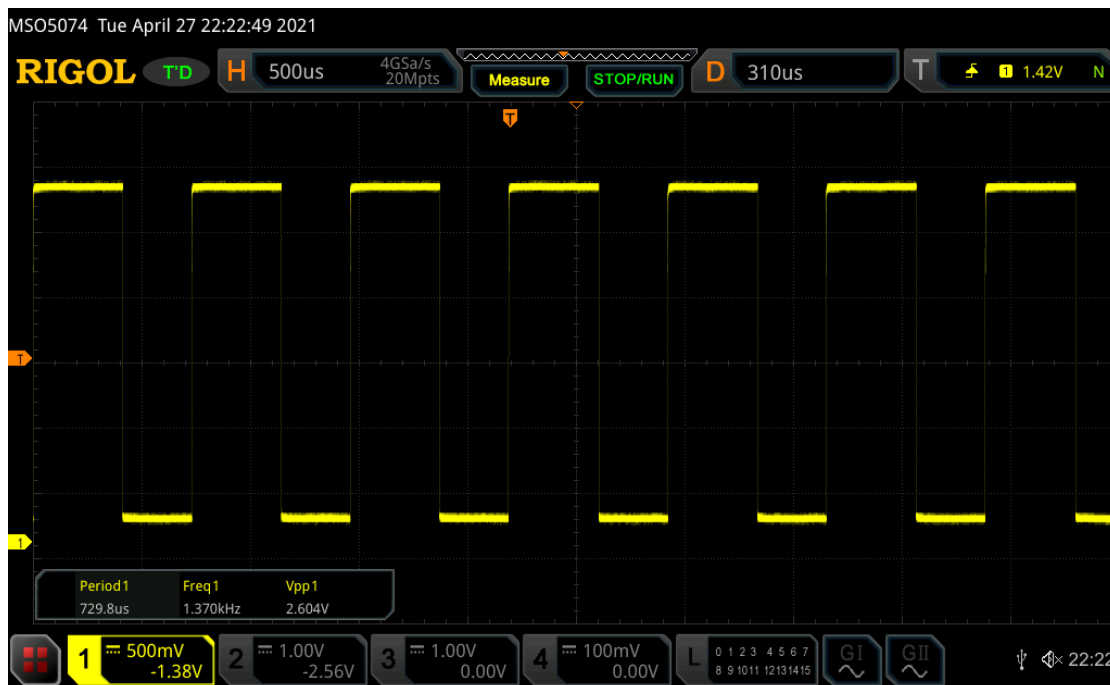
Implementace a naměřené průběhy

Následující průběhy v této kapitole byly zaznamenány na osciloskopu RIGOL MSO5074.

Ukázka několika not zahraniých pomocí MIDI je k poslechnutí [zde](#) (stopa 1).

5.1 VCO

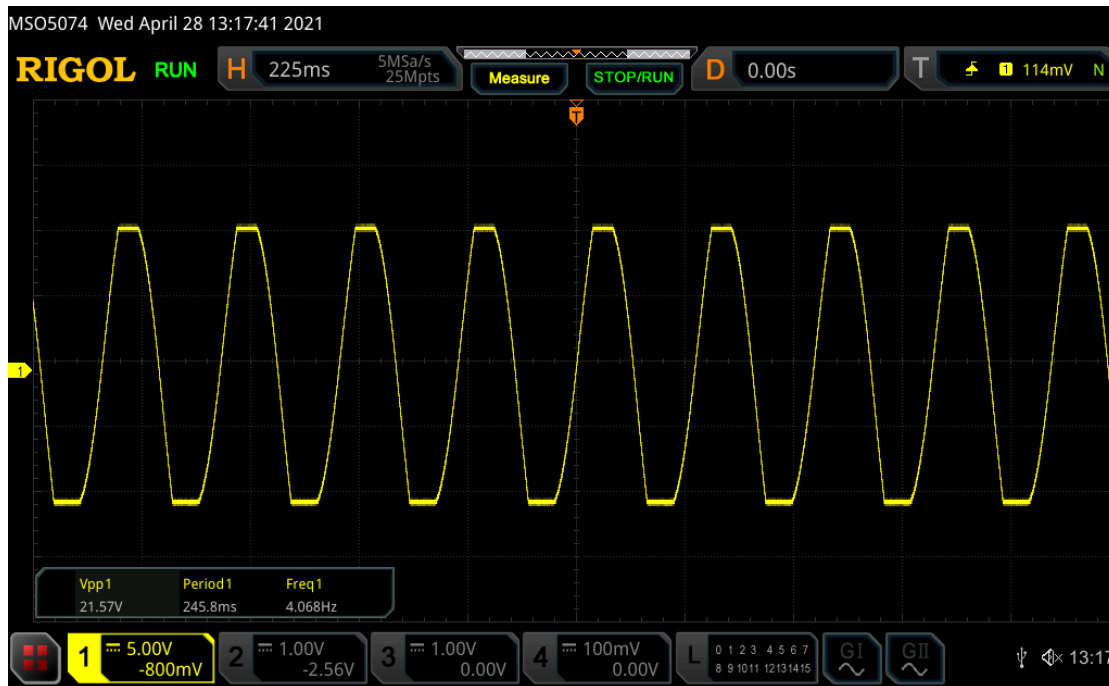
Pro VCO bylo předpokladem, že bude mít obdélníkový tvar signálu a bude kmitat mezi 240 Hz a 1568 Hz, což bylo v rámci měření na osciloskopu potvrzeno. Na obrázku 5.1 je vidět, jak průběh signálu vypadá při frekvenci 1,37 kHz. Nevýhodou tohoto VCO je jeho nestálost ve střídě při změně frekvence. Průběh VCO je možné si poslechnout [zde](#) (stopa 2).



Obrázek 5.1: VCO na frekvenci 1,37 kHz

5.2 LFO

V části návrhu byl vypočten rozsah LFO od 4 Hz do 34 Hz. Při měření se ovšem dosáhlo pouze rozsahu od 4 Hz do 28 Hz. Na obrázku 5.2 je vidět průběh pro frekvenci 4 Hz. Lze pozorovat, že sinusový průběh není ideální, ale pro potřeby syntezátoru je dostatečný. Toto omezení amplitudy v obou polaritách je nejspíše dáno přílišným zesílením, které je větší než 3, což je minimální hodnota. Při použití pevných rezistorů toto bohužel nelze ovlivnit a při jakémkoliv zesílení menší než 3 by oscilátor přestal oscilovat.



Obrázek 5.2: LFO na frekvenci 4 Hz

5.3 Generátor šumu

Bílý šum z osciloskopu na obrázku 5.3. K poslechu [zde](#) (stopa 3).



Obrázek 5.3: Bílý šum

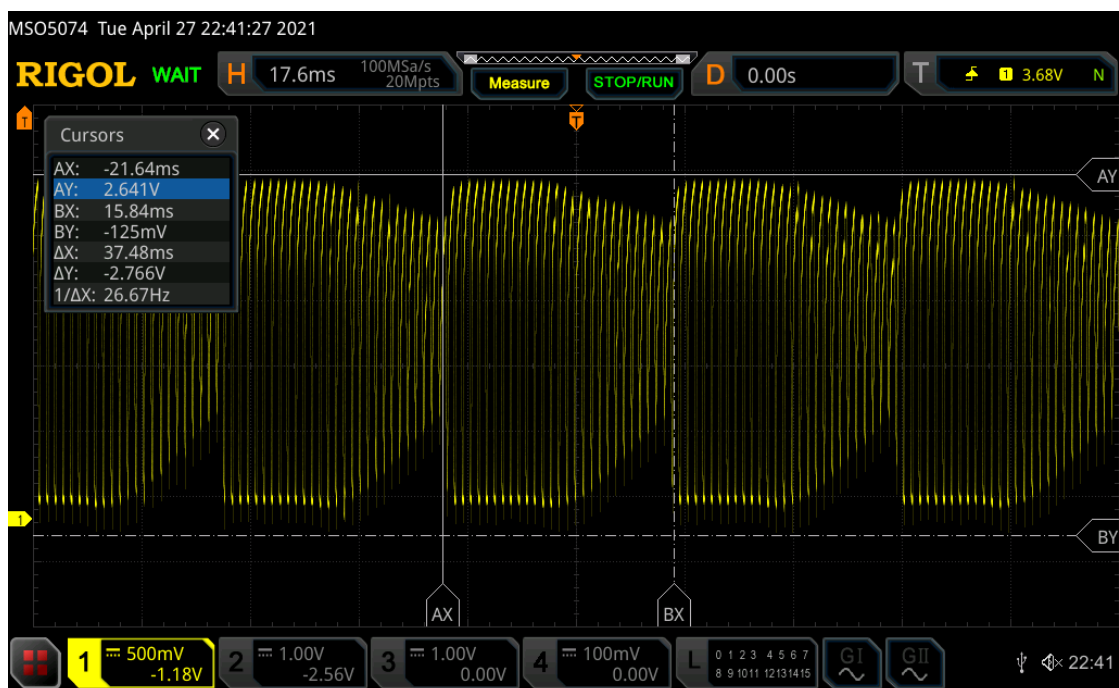
5.4 VCF

Pro VCF lze na tomto syntezátoru vytvořit kombinaci, kdy na vstup jde VCO a CV ovládá LFO. Takovouto kombinaci je možné vidět na obrázku 5.4, kde LFO bylo nastaveno na 4 Hz. Poslechnout si tuto kombinaci je možné [zde](#) (stopa 4).



Obrázek 5.4: LFO na 4 Hz, VCF a VCO

Stejnou kombinaci, akorát s vyšší frekvencí LFO, konkrétně 27 Hz, lze pozorovat na obrázku 5.5.



Obrázek 5.5: LFO na 27 Hz, VCF a VCO

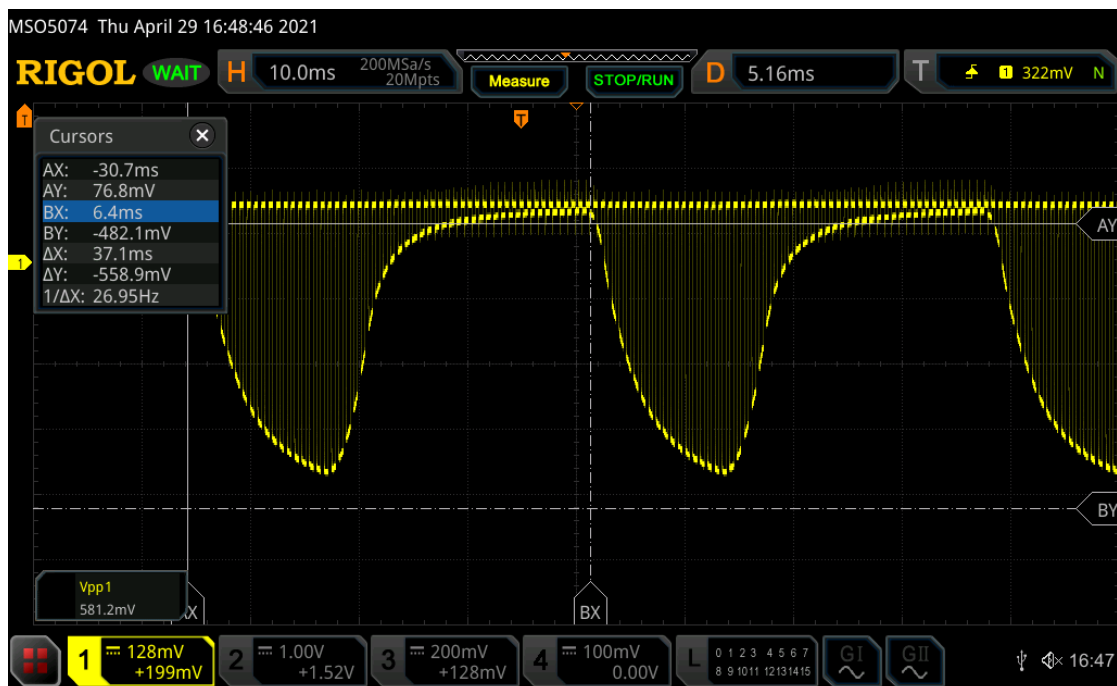
Druhou variantou je možnost vyměnit zdroj zvuk za generátor šumu. Takovýto průběh je na obrázku 5.6 a je možné ho slyšet [zde](#) (stopa 5).



Obrázek 5.6: LFO na 4 Hz, VCF a šum

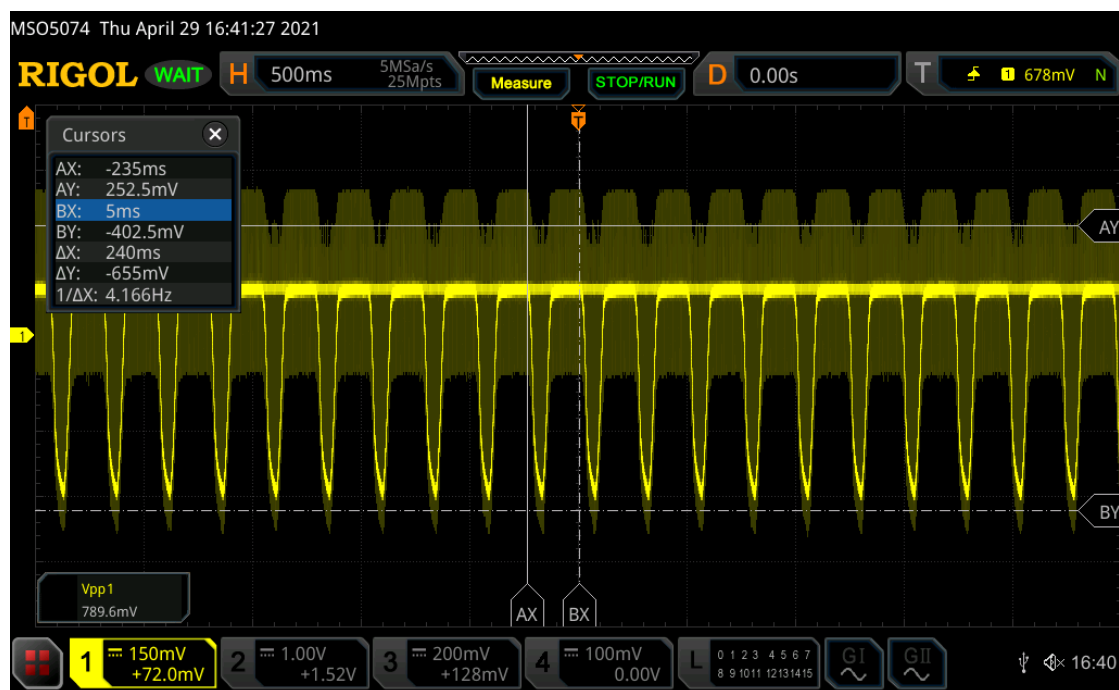
5.5 VCA

Podobně jako s VCF lze stejné kombinace vytvořit i s VCA. Kombinace s VCO lze vidět na obrázcích 5.7 a 5.8 a lze si jí poslechnout [zde](#) (stopa 6) a s rychlejším naběhem [zde](#) (stopa 7). Kombinaci s generátorem šumu lze vidět na obrázku 5.9

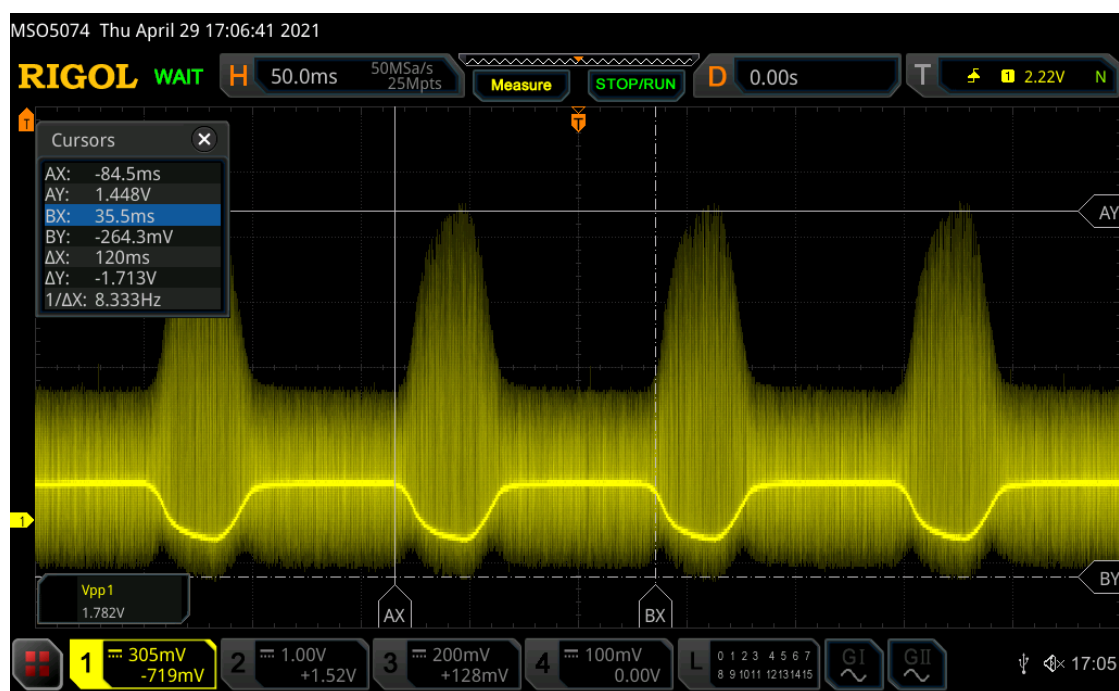


Obrázek 5.7: LFO, VCA a VCO

a poslechnout [zde](#) (stopa 8) a s rychlejším naběhem [zde](#) (stopa 9).



Obrázek 5.8: LFO, VCA a VCO s rychlejším naběhem



Obrázek 5.9: LFO, VCA a šum

Při minimální hodnotě potenciometru byla maximální amplituda a rychlý naběh. Při zvyšování hodnoty potenciometru se amplituda snižovala a výsledný zvuk byl jemnější.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a implementovat hudební syntezátor zvuku doplněný o sekvencer. Tento cíl byl splněn, jelikož se povedlo splnit všechny body zadání a vytvořit tak funkční hudební nástroj.

V průběhu této práce byly představeny základy modulárních syntezátorů včetně stručné historie a standardu Eurorack. Syntezátor byl postaven na platformě mikrokontroléru Nucleo-FR334R8, který zajišťoval základní operace pro sekvencer, MIDI i některé ovládání modulů. Celý produkt byl umístěn do krabičky s čelním ovládacím panelem.

Všechny moduly se povedlo úspěšně navrhnout a implementovat. U VCO bylo dosaženo frekvence 240 Hz – 1600 Hz obdélníkového průběhu pomocí integrovaného obvodu 555. LFO vytvářelo sinusový tvar signálu s rozsahem 4 Hz – 27 Hz. K tomu byl použit oscilátor s Wienovým článkem. VCF byl postaven jako dolní propust s regulovatelnou mezní frekvencí mezi 1,59 Hz – 1591 Hz, která šla měnit pomocí CV. U tohoto modulu byla podobně jako u VCA použita součástka vactrol. Generátor šumu vytvářel pomocí Zenerova průrazu na tranzistoru širokospektrální bílý šum.

Dále byl k nástroji připojen sekvencer s osmi pozicemi a osmi notami k výběru. Nastavení sekvenceru zajišťoval rotační enkodér. Tóny šly dále v režimu tomu určeném ovládat pomocí standardu MIDI. Na čelním panelu se také nachází 3W reproduktor pro snazší přehrávání.

Hudební nástroj je možné díky modularitě v rámci dalších prací doplnit o jakékoliv další moduly nebo vylepšit ty stávající. Platforma Nucleo taktéž nechává volné ruce při rozšiřování. Jednotlivé části se dají postavit s několika málo součástkami na nepájivém poli.

Bohužel se během testování vyskytly problémy se zdrojem +5 V, který rušil výstup z VCO. Dočasným řešením bylo využití laboratorního zdroje pro tento typ napájení. Tento problém bude v nejbližší době vyřešen.

Literatura

- [1] VAIL, Mark. *THE SYNTHESIZER, A Comprehensive Guide to Understanding, Programming, Playing, and Recording the Ultimate Electronic Music Instrument*. Oxford University Press, 2014. ISBN 978-0-19-539481-8.
- [2] *8 of most important modular synthesizers in music history*. [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.factmag.com/2017/09/21/most-important-modular-synths-in-history/>
- [3] *Těremin* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.thomann.de/>
- [4] JENKINS, Mark. *Analog Synthesizers: understanding, performing, buying: from the legacy of Moog to software synthesis*. 1. vydání. Routledge, 2019. ISBN 978-0-240-52072-8.
- [5] SCARR, Howard. *Programming analogue synths*. ACCESS, 2002.
- [6] *Minimoog model D* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://tonetweakers.com/products/moog-minimoog-model-d>
- [7] *Buchla 100 series* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <http://www.vintagesynth.com/misc/buchla100.php>
- [8] *ARP 2500* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://tonetweakers.com/products/arp-2500-model-2502>
- [9] *Beginner 's Guide to Eurorack* [online]. Reverb.com LLC, c2021. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://reverb.com/news/beginners-guide-to-eurorack-case-basics-oscillators-filters>
- [10] *Dieter Doepfer: Completing the Circuit* [online]. Ableton. [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://www.ableton.com/en/blog/dieter-doefer-completing-the-circuit/>
- [11] *Manufactures* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.modulargrid.net/e/vendors/index/sort:Vendor.name/direction:asc>
- [12] *Eurorack* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.factmag.com/2017/09/21/modular-synth-eurorack-buyers-guide/>
- [13] *Metody zvukové syntézy*. [online]. Telotone, c2018. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/metody-zvukove-syntezy>
- [14] EDSTROM, Brent. *Arduino for musicians: A complete Guide to Arduino an Teensy Microcontrollers*. Oxford University Press, 2016. ISBN 978-0-19-930931-3.

- [15] CANN, Simon. *How to Make a Noise: A comprehensive Guide to Synthesizer Programming*. Coombe Hill Publishing, 2014. ISBN 978-0-19-930931-3.
- [16] FRIEDMAN, Dean. *Synthesizer basics*. Amsco Publications, New York, 1985.
- [17] MITCHELL, Eric P.; GEHRING, Mark R. *Voltage controlled oscillator*. U.S. Patent No 6,903,613, 2005.
- [18] WILSON, Ray. *Make: Analog Synthesizers: Make Electronic Sounds the Synth-DIY Way*. Maker Media, Inc., 2013. ISBN 978-1-449-34552-8.
- [19] RÉVEILLAC, Jean-Michael. *Musical Sound Effects: Analog and Digital Sound Processing*. John Wiley & Sons, 2018. ISBN 978-1-78630-131-4.
- [20] CROMBIE, David. *THE COMPLETE SYNTHESIZER: A Comprehensive Guide*. Digitized by Neuronick, 2001.
- [21] *The Synthesizer Academy*. [online]. [cit. 2021-4-13]. Dostupné z: <http://synthesizeracademy.com/>
- [22] *White noise*. [online]. Encyclopaedia Britannica, Inc., c2021. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/art/white-noise-music>
- [23] ROSENHOUSE, G. *Colours of noise fractals and applications*. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 2014, 9.4: 255-265.
- [24] *What Is Pink Noise and How Does It Compare with Other Sonic Hues?* [online]. Healthline media, c2021. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.healthline.com/health/pink-noise-sleep#description>
- [25] FORRÓ, Daniel. *MIDI. Komunikace v hudbě*. Grada, 1993. ISBN 80-85623-56-0
- [26] HUBER, David Miles. *The MIDI manual: a practical guide to MIDI in the project studio*. 3. vydání. Taylor & Francis, 2007. ISBN 978-0-240-80798-0.
- [27] RUSS, Martin. *Sound synthesis and sampling*. Taylor & Francis, 2004. ISBN 978-0-240-52105-3
- [28] ABRAR, Md Moyeed. *Design and implementation of astable multivibrator using 555 timer*. IOSR J. Electr. Electron. Eng, 2017, 12.1: 22-29.
- [29] MOHYLOVÁ, Jitka, Josef PUNČOCHÁŘ. *Theory of electronic circuits*. Vysoká škola báňská, Ostrava, 2013.
- [30] *The Wien Bridge Oscillator*. [online]. Aspencore. [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/wien_bridge.html
- [31] KUHN, A. Kenneth. *Sine Wave Oscillators*. 2009.
- [32] *Advanced Tutorial Lesson 4: Designing Low & High Frequency Oscillator Circuits*. [online]. c2016. [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: http://www.emagtech.com/wiki/index.php/Advanced_Tutorial_Lesson_4:_Designing_Low_%26_High_Frequency_Oscillator_Circuits

- [33] Design Notes on the Resistance-Capacity Oscillator Circuit. *Hewlett Packard Journal: Technical information from the hp laboratories*. Palo Alto, Listopad 1949, 1(3), 1-4.
- [34] PARKER, Julian; D'ANGELO, Stephano. *A digital model of the Buchla lowpass-gate*. In: Proc. Int. Conf. Digital Audio Effects (DAFx-13), Maynooth, Ireland. 2013. p. 278-285.
- [35] Kristian Blåsol, 2018, *Vactrol VCAs and CV attenuators – DIY Modular in a Week 2.1* YouTube video. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ljJFSOW14Rc>
- [36] STORK, Milan. *Sinusoidal and Relaxation Wide Range Voltage Controlled Oscillators*. Communications-Scientific letters of the University of Zilina, 2015, 17.1A: 83-88.
- [37] A "White Noise" Generator using avalanche-mode biasing. [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: http://freenrg.info/Physics/Scalar_Vector_Pot_And_Rick_Andersen/Rick_Andersen_NoiseGen.htm
- [38] *Synth DIY: a White Noise generator*. [online]. [cit. 2021-14-21]. Dostupné z: <https://synthnerd.wordpress.com/2020/03/09/synth-diy-a-white-noise-generator/>
- [39] LM386 Low Voltage Audio Power Amplifier. [online katalogový list]. Texas Instruments, 2017 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm386.pdf?ts=1620469196130&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

Příloha A

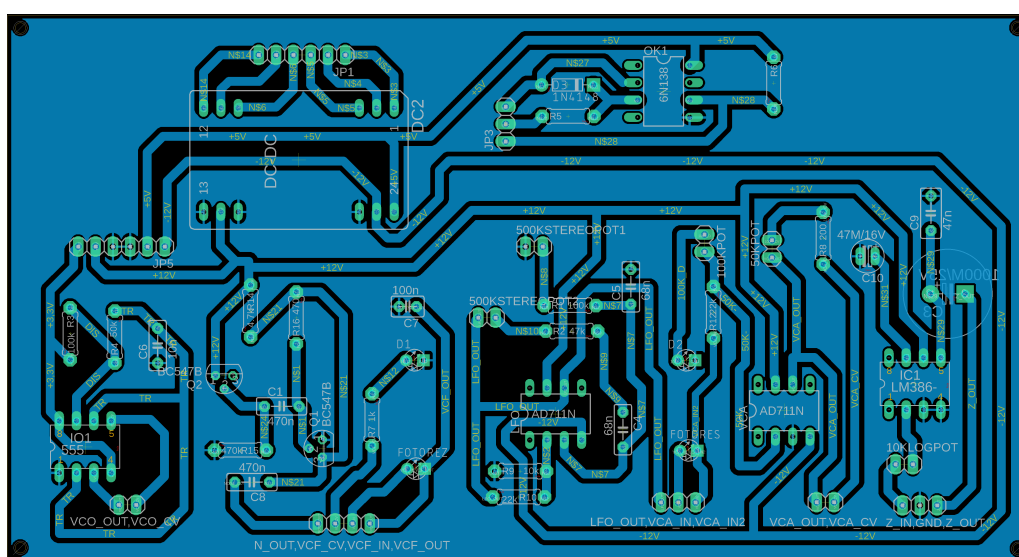
Tabulka pro naladění VCO

nota	frekvence [Hz]	hodnota pro Nucleo	MIDI
malá oktáva			
Ais/B	243	0,969	22
H	247	0,968	23
jednočárkovaná oktáva			
C	261,6	0,962	24
Cis/Des	277,2	0,962	25
D	293,66	0,941	26
Dis/Es	311,13	0,93	27
E	329,63	0,920	28
F	349,23	0,905	29
Fis/Ges	367	0,898	30
G	392	0,884	31
Gis/As	415,3	0,870	32
A	440	0,8565	33
Ais/B	466,16	0,842	34
H	493,88	0,825	35
dvoučárkovaná oktáva			
C	523,25	0,808	36
Cis/Des	554,47	0,787	37
D	587,33	0,768	38
Dis/Es	622,25	0,747	39
E	659,26	0,726	40
F	698,46	0,706	41
Fis/Ges	739,99	0,684	42
G	783,99	0,663	43
Gis/As	830,61	0,640	44
A	880	0,611	45
Ais/B	932,33	0,68	46
H	987,77	0,565	47

nota	frekvence [Hz]	hodnota pro Nucleo	MIDI
tříčárková októva			
C	1046,5	0,536	48
Cis/Des	1108,73	0,508	49
D	1174,66	0,48	50
Dis/Es	1244,51	0,452	51
E	1318,51	0,427	52
F	1396,91	0,385	53
Fis/Ges	1479,98	0,36	54
G	1568	0,324	55

Příloha B

DPS



Obrázek B.1: Deska plošného spoje