



Středoškolská technika 2025

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Modulární syntezátor

Jonáš Groot

Střední škola elektrotechnická Lipník nad Bečvou, Tyršova 781

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Modulární syntezátor

Jonáš Groot

Olomoucký kraj

Lipník nad Bečvou 2025

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Modulární syntezátor

Modular synthesizer

Autor:	Jonáš Groot
Škola:	Střední škola elektrotechnická, Tyršova 781, 751 31, Lipník nad Bečvou
Kraj:	Olomoucký
Konzultant:	Ing. Lukáš Koziel

Lipník nad Bečvou 2025

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze mé práce jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Lipníku nad Bečvou dne: 31. března 2025

Jonáš Groot

Poděkování

Děkuji svému konzultantovi práce Ing. Lukášovi Kozielovi a Ing. Petru Hronkovi za podnětné připomínky při zpracování práce a paní Ing. Miladě Figalové za připomínky k stylistickým úpravám soutěžní práce SOČ.

Anotace

Cílem práce je výroba analogového modulárního syntezátoru. Teoretická část popisuje obecně jednotlivé prvky elektronických bloků, jejich funkce a použití při tvorbě zvukových podkladů pro hudební produkci včetně možností a využití syntezátoru. Praktická část popisuje funkce jednotlivých uvedených prvků vytvořeného analogového modulárního syntezátoru.

Klíčová slova

Bipolární zdroj napětí; modulární syntezátor; napět'ové řízení; analogový sekvencer.

Annotation

The aim of the work is to create an analog modular synthesizer. The theoretical part describes the individual components of electronic blocks in general, their functions, and their use in creating sound material for music production, including the possibilities and uses of the synthesizer. The practical part describes the functions of the individual components of the created analog modular synthesizer.

Keywords

Bipolar voltage source; modular synthesizer; voltage control; analog sequencer.

Obsah

Úvod.....	6
1 Historie.....	7
Teoretická část	8
2 pojem a základy modulů syntezátoru.....	8
2.1 Napěťově ovládané moduly a generátory zvuku	9
2.1.1 VCO	9
2.1.2 VCA	10
2.1.3 VCF.....	11
2.1.4 Generátor šumu.....	12
2.2 Řídicí moduly	13
2.2.1 LFO	13
2.2.2 ENV	14
2.3 Analogový sekvencer.....	15
2.4 Možnosti a využití	16
Praktická část	17
2.5 Bipolární zdroj $\pm 12\text{ V}$ se zemí 0 V	18
2.5.1 VCO s PWM – Schmittův klopný obvod	19
2.5.2 LM13700 VCA - transkonduktanční OZ.....	20
2.5.3 LM13700 VCF.....	21
2.5.4 ICL8038 LFO	22
2.5.5 Jednoduchý generátor křivky AR s OZ a kondenzátorem	23
2.5.6 2N3904 NPN tranzistorový generátor šumu s OZ.....	24
2.5.7 Analogový sequencer s přídavky	25
Závěr	28
3 Seznam zkratk	29
4 Použitá literatura	30
5 Seznam obrázků	31
5.1 Ukázkové průběhy na osciloskopu	31
5.2 Schematická zapojení	31
6 Seznam příloh	32
7 Přílohy.....	33

ÚVOD

Tato práce se zabývá sestavením, principem a aplikacemi základního modulárního syntezátoru v oblasti elektronické hudební produkce.

Modulární syntezátor je elektronický hudební nástroj převážně užíván k hudební produkci. Princip každého modulárního syntezátoru, už podle svého názvu, je možnost propojovat libovolné prvky/moduly mezi sebou nebo je dokonce externě vyvést a použít jako ovládací prvek pro ostatní zařízení a naopak.

Obsahem praktické části práce je vysvětlení principu funkce stejnosměrného bipolárního zdroje napětí ($\pm 12\text{ V}$) pro napájení celého přístroje, komponentů/modulů a jejich možnost propojení.

Použitými moduly pro jejich sestavení jsou: napět'ové ovládaný oscilátor s rozsahem přibližně 1 Hz – 30 kHz , filtr, zesilovač, envelope a nízkofrekvenční oscilátor s frekvenčním rozsahem přibližně $0,2\text{ Hz}$ – 3 kHz .

Další část se poté zabývá samotným analogovým sekvencerem, jehož účel je generovat posloupnost napětí v určitém časovém intervalu (vestavěný časovač), kde dále je možnost využít tento výstup na ovládání libovolných modulů.

Celý výrobek je navržen tak, aby každý vstup a výstup byl libovolně mezi sebou spojen a ovládán pouze napětím v rozsahu napájecího napětí.

1 HISTORIE

Počátkem rozvoje elektronických syntezátorů byla 30. léta minulého století. Takovým prvním elektrickým zařízením, které se dalo považovat za první elektronický hudební nástroj, byl tzv. **těremin**, pojmenován podle svého autora **Lva Sergeyeviche Theremina**. Princip fungování spočívá v interakci rukou s elektromagnetickým polem v blízkosti vertikálně uloženého kovového vodiče, kde vzdáleným přibližováním a oddalováním se mění výstupní tón nástroje.



Obr. 1: Starý hudební nástroj - těremin

Přibližně v 60. letech minulého století došlo k pojmenování syntezátoru na modulární, což je synonymem slova stavebnicový. Dva hlavní představitelé rozvoje modulárních syntezátorů jsou Robert **Moog** a Donald **Buchla**, kteří navrhli jeden z prvních nejpoužívanějších konstrukčních typů a sestavení syntezátoru, které se používají dodnes. Od 80. let minulého století se začaly uvádět na trh digitální syntezátory, které postupem času nahradily analogové syntezátory. Jeden z nejznámějších a prvních velmi úspěšných digitálních syntezátorů byla **DX7** od společnosti **Yamaha**, kde princip a funkce jsou stejné jako u analogových, kdežto jeho charakteristický zvuk byl jedinečný.



Obr. 2: Elektronický hudební nástroj Yamaha DX7

TEORETICKÁ ČÁST

2 POJEM A ZÁKLADY MODULŮ SYNTEZÁTORU

V této části se zabývám objasněním základních pojmů a prvků modulárního syntezátoru. Na základě těchto znalostí lze pochopit, jak a k čemu můžeme využít jednotlivé bloky a jak je navzájem propojit mezi sebou, kde se můžeme dopracovat k požadovanému výsledku.

Moduly se dělí podle své funkčnosti na dva typy, a to generátory či modifikátory zvuku nebo prvky sloužící pro ovládání či ve své podstatě nahrazení manuálního ovládání.

Každý takový syntezátor obsahuje několik ovládacích prvků a možností, jak pro manuální nastavení hodnot, tak pro kabelové propojení mezi bloky.

V principu se pro manuální nastavování využívají potenciometry pro upravování škálových hodnot (výška frekvence, zesílení, intenzita, ...) nebo různé spínače, tlačítka a přepínače, jak pro přepínání různých módů rozsahů (Filtr – LPF, HPF; LFO – HI, LOW frequency, ...), konfigurací, tak pro logická zapojení (u sekvenceru).

2.1 Napětově ovládané moduly a generátory zvuku

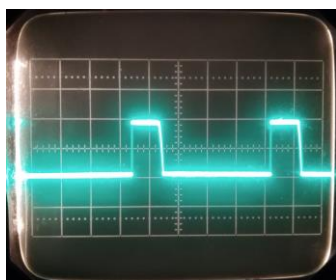
2.1.1 VCO

Název VCO znamená ve zkratce „Voltage Controlled Oscillator“. Jedná se o napětově ovládaný oscilátor, jehož funkcí je generování vlny, například ze základních typů vln: pila, rampa, čtverec + PWM, pyramida a sinusovka, a možnost ovládání frekvence tohoto oscilátoru pomocí napětí.

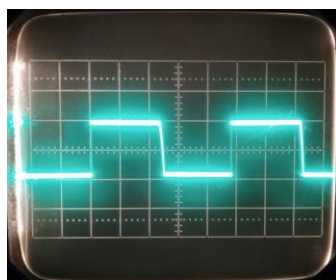
Můžeme se setkat s různými typy oscilátorů, které jsou nakonfigurované na specifickou vstupní napětíovou škálu, která zajistí laditelnost frekvence oscilátoru. Základním pravidlem pro naladěný oscilátor je určený rozsah 1 V/OCT, což znamená, že zvýšení o 1 volt způsobí zdvojení frekvence 2x.



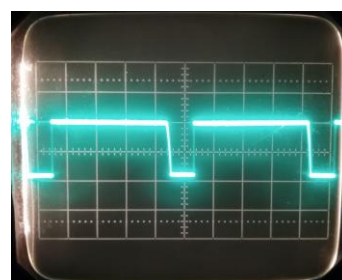
Obr. 3: Ukázka výstupu pilového průběhu



Obr. 4: Ukázka PWM výstupu s cca 20 % dobou spínání



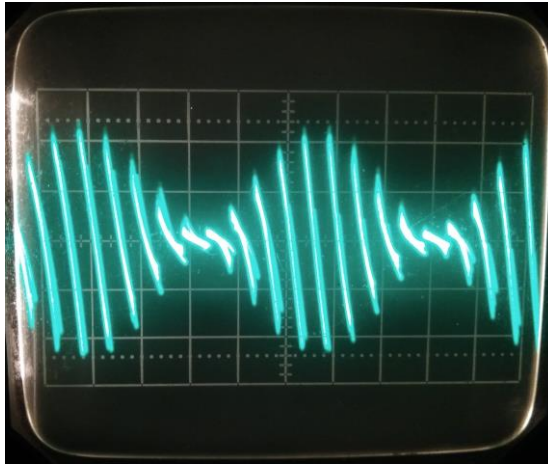
Obr. 5: Ukázka PWM výstupu s cca 50 % dobou spínání



Obr. 6: Ukázka PWM výstupu s cca 80 % dobou spínání

2.1.2 VCA

Název VCA znamená ve zkratce „Voltage Controlled Amplifier“. Jedná se o napěťově ovládaný zesilovač, jehož funkcí je zesilovat a zeslabovat vstupní signál pouze napětím, tedy řídí úroveň hlasitosti přivedeného signálu na základě napětí. Dá se říct, že se jedná o náhradu potenciometru, který se ovládá manuálně. Zde se ovládání úrovně hlasitosti provádí dodávaným napětím v reálném čase.



Obr. 7: Ukázka amplitudové modulace pilového průběhu

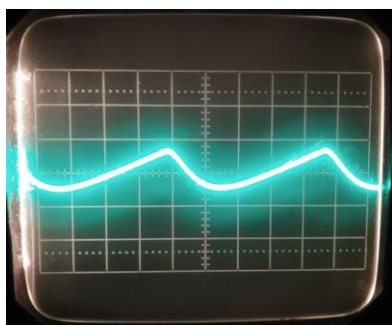
2.1.3 VCF

Název VCF znamená ve zkratce „Voltage Controlled Filter“. Jedná se o napěťově ovládaný filtr, spadá to kategorie efektů, jelikož dodává doplňující charakter a upravuje vstupní signál.

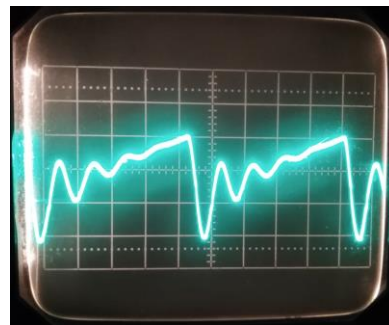
Základní funkcí VCF je filtrovat zvuk tím, že umožňuje procházet pouze ty frekvence a ostatní potlačuje. Ovládání tohoto filtru je řízené napětím, což znamená, že napětí na jeho vstupu určuje, jaký rozsah frekvencí bude filtrovat

U takový VCF se můžeme setkat s obsahem ovladatelných prvků jako, CUTOFF, Rezonance, přepínání módů LPF, HPF, ...

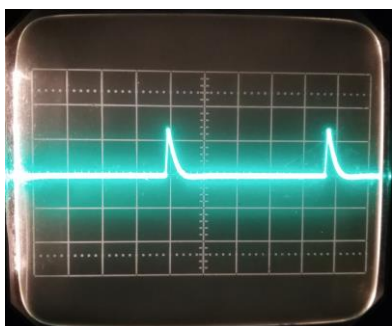
Funkce Rezonance spočívá v ovládání zpětné vazby mezi výstupem a vstupem v bodě filtru, který se nazývá CUTOFF. Tento bod určuje hranici, kde se začínají frekvence filtrovat, což může vést k zeslabení či kompletnímu potlačení specifických frekvencí. Jaký efekt bude mít filtr, závisí na jeho typu, např. LPF (Low Pass Filter), HPF (High Pass Filter), atd.



Obr. 8: Ukázka výstupu LPF filtru se vstupním signálem pilového průběhu bez rezonance



Obr. 9: Ukázka výstupu LPF filtru se vstupním signálem pilového průběhu s rezancí



Obr. 10: Ukázka výstupu HPF filtru se vstupním signálem pilového průběhu bez rezonance

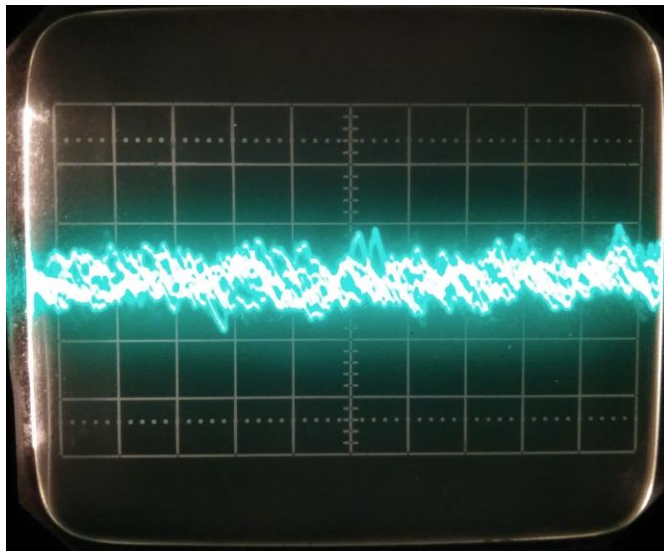


Obr. 11: Ukázka výstupu HPF se vstupním signálem pilového průběhu s rezancí

2.1.4 Generátor šumu

Jak už vyplývá z názvu, jedná se o obvod, který generuje šum.

Existuje několik variant šumu - růžový, bílý, hnědý, ... Rozdíl mezi těmito typy spočívá pouze ve specifické filtraci určitých frekvencí, kde výsledkem vznikne v podstatě normalizovaný šum.



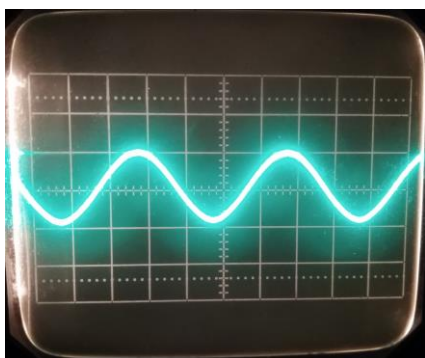
Obr. 12: Ukázka šumu

2.2 Řídící moduly

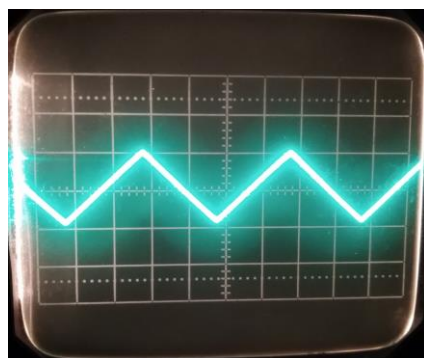
2.2.1 LFO

Název LFO ve zkratce znamená „Low Frequency Oscillator“. Jedná se o nízkofrekvenční oscilátor, jehož princip a funkce jsou stejné jako u napětově řízeného oscilátoru VCO, dokonce se dá nahradit a použít LFO místo VCO a naopak. podle svého názvu a funkce se používá jako řídicí prvek pro ovládání různých hodnot bloků, které mají vstup CV bez potřeby manuálního ovládání (otáčením knoflíkem rukou).

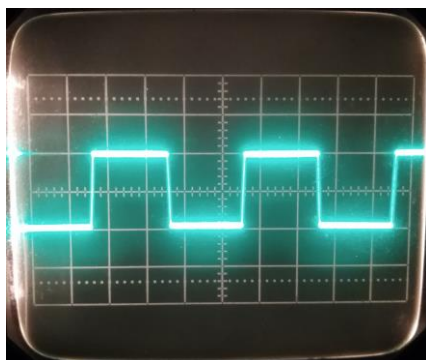
Ukázka základních výstupů LFO na osciloskopu:



Obr. 13: Ukázka výstupu LFO se sinusovým průběhem



Obr. 14: Ukázka výstupu LFO s trojúhelníkovým průběhem



Obr. 15: Ukázka výstupu LFO s čtvercovým průběhem

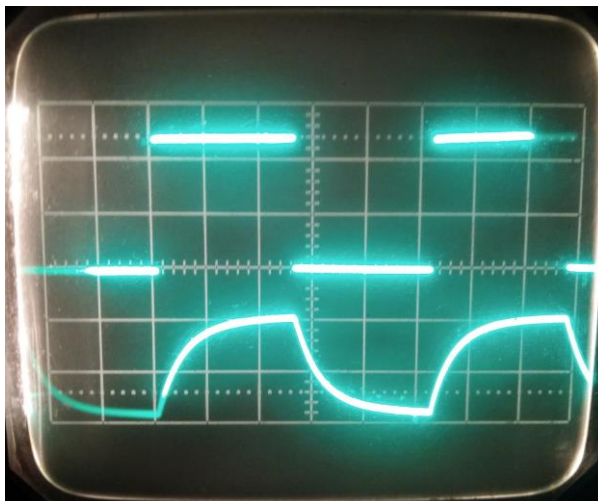
2.2.2 ENV

Název ENV ve zkratce znamená „Envelope“. Jedná se o typ modulu, který se používá pro převod impulsu či GATE signálu na tento impuls či GATE signál s delším spádem a delší náběžnou hranou, kdy jsme schopni ovládat dobu spádu a náběhu.

Tento princip je stejný jako u nabíjení kondenzátoru. Když se kondenzátor nabíjí, trvá nějakou dobu, než se dostane na stejnou hodnotu tohoto GATE signálu. Až se GATE signál vypne (0 V), tak se kondenzátor postupně vybíjí.

Tyto dvě vlastnosti se nazývají „Attack“ a „Release“, kde „Attack“ představuje nabíhající náběžnou hranu, kdežto „Release“ představuje postupný spád sestupné hrany. Tyto vlastnosti lze použít pro delší dozvuk různého zvuku.

Ve zvuku se tento prvek nejčastěji používá např. pro náběh a dozvuk zvuku.

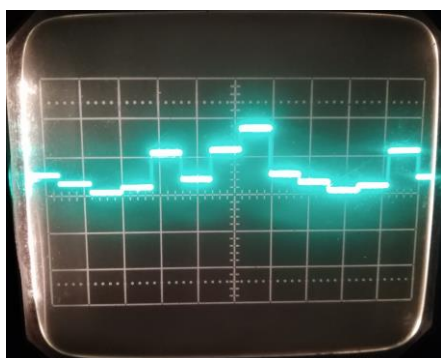


Obr. 16: Ukázka vstupu GATE (nahore) a výstupu ENV (dole)

2.3 Analogový sekvencer

Sekvencer je obvod či zařízení, které automatizovaně pouští uživatelem naprogramovanou sekvenci, která se může použít pro vytváření melodií.

Základním obsahem takového analogového sekvenceru je ovládání rychlosti/tempa pouštění sekvence, nastavování úrovní napětí pro jednotlivé kroky společně s jejich aktivací či vypnutím a výstupy CV, GATE a synchronizace.



Obr. 17: Ukázka CV výstupu ze sekvenceru – v. 1



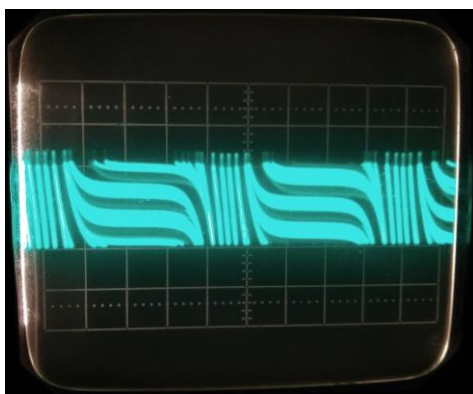
Obr. 18: Ukázka CV výstupu ze sekvenceru – v. 2

2.4 Možnosti a využití

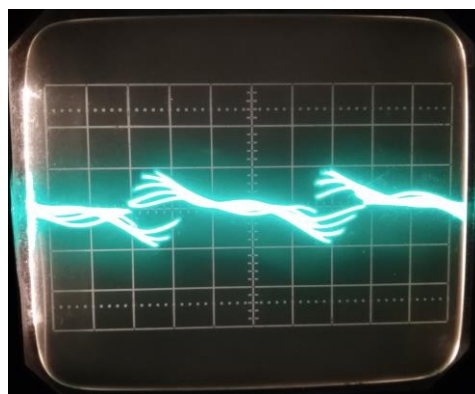
Jednotlivé funkce bloků jsou základem každého syntezátoru, který je určitým způsobem rozsáhlejší a není pouze generátor zvuku.

Vytváření propojení mezi jednotlivými bloky, které spolu dohromady ovlivňují celkové chování přístroje a jeho zvuk, se nazývá „patching“. Tento proces umožňuje upravit a kombinovat různé bloky tak, aby uživatel dosáhl požadovaného zvuku.

Takovým příkladem použití je frekvenční modulace, amplitudová modulace, sekvenční ovládání zesílení VCA a další.



Obr. 19: Ukázka modulace VCO pilového průběhu s LFO se sinusovým průběhem



Obr. 20: Ukázka CUTOFF modulace LFO se sinusovým průběhem

PRAKTICKÁ ČÁST

Tato kapitola se zabývá základním popisem funkčnosti jednotlivých bloků analogového modulárního syntezátoru. Popisy jsou doplněny fotografiemi Obr. 3 až Obr.20 a obrázky schémat, které jsem v tomto projektu využil.

2.5 Bipolární zdroj ± 12 V se zemí 0 V

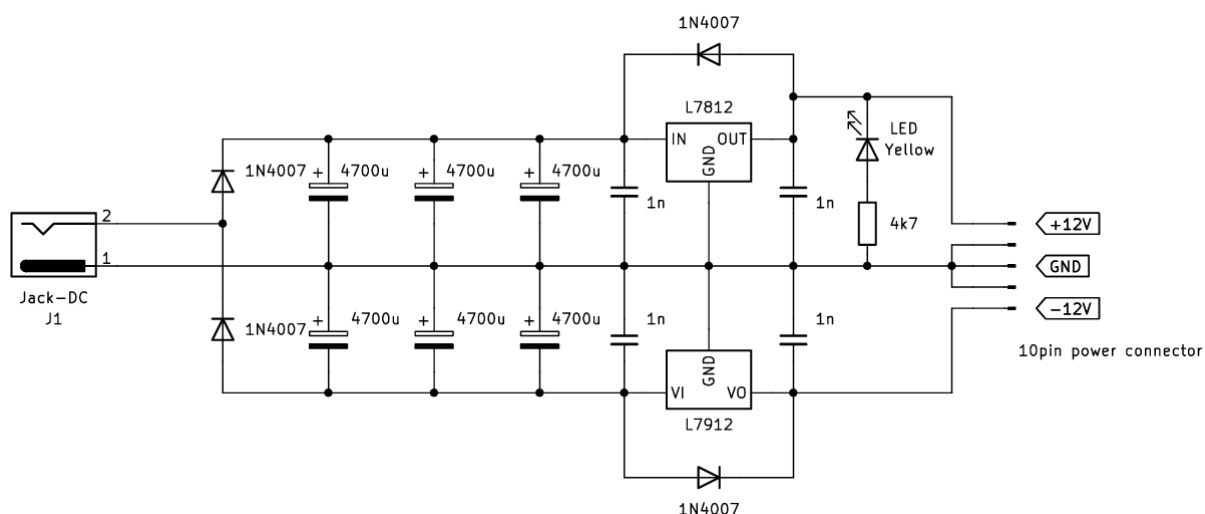
Každý obvod potřebuje svůj zdroj napájení s určitým počtem voltů a maximálním množstvím dodávaných ampérů. U analogových syntezátorů se nejčastěji objevují zdroje dodávající bipolární napájení, pohybující se kolem ± 9 – 15 V společně se zemí 0 V. V mém projektu jsem se rozhodl pro celkové napájení veškerých obvodů pro ± 12 V, jelikož se tato hodnota nejvíce používá a je standardizována.

Zdroj je typu AC/DC převaděč z 12 V AC RMS na ± 12 V DC a zem 0 V, takže je možné použít jakýkoliv komerční adaptér, který splňuje vstupní požadavky.

Princip funkce:

Vstup je zajištěn konektorem 2,5 mm, kde je přivedeno 12 V AC RMS z adaptéru, který převede zásuvkové napětí na těchto 12 V RMS. Toto střídavé napětí je rozděleno diodami typu 1N4007 na kladnou a zápornou půlvlnu. Na výstupech jsou zapojeny 3x3 elektrolytických kondenzátorů o hodnotě 4700 μ F. Tyto kondenzátory jsou rozdělené tak, že první tři jsou zapojeny mezi kladným výstupem diody (katodou) a zemí 0 V, to zajistí vyhlazení kladné střídavé půlvlny, takto vznikne konstantní napětí. Druhá polovina je připojena mezi záporným výstupem diody (anodou) a zemí, výstupem je poté konstantní negativní napětí o hodnotě zhruba kolem 14 V. Při zapojování kondenzátorů jak pro kladné a záporné napětí se řeší polarita, jelikož se jedná o kondenzátory elektrolytické.

Pozitivní a negativní výstupy z kondenzátorů jsou poté zapojeny do regulátoru (LM7812, LM7912), které zajistí usměrnění napětí na ± 12 V a spolehlivý odběr proudu omezený na zhruba 1,2 A.



Obr. 21: Schematické zapojení bipolárního zdroje AC-DC ± 12 V

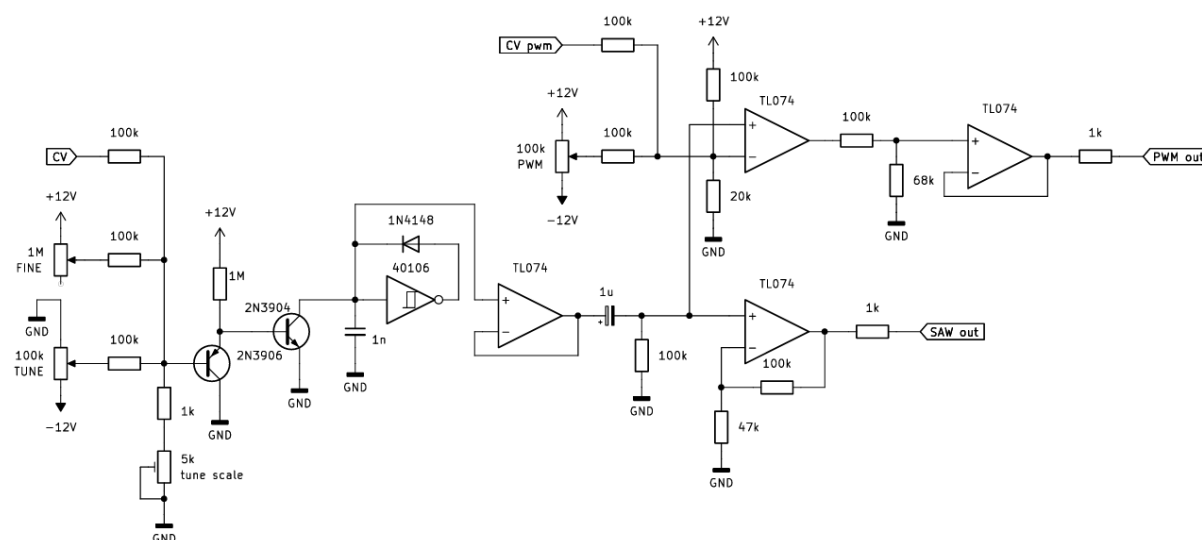
2.5.1 VCO s PWM – Schmittův klopný obvod

Syntezátor obsahuje dva stejné oscilátory („VCO’čka“), jejichž možnosti ovládání jsou TUNE, FINETUNE, vstup CV pro PWM společně s potenciometrem, vstup CV pro ovládání frekvence oscilátoru a dva výstupy, jeden pro pilu a druhý pro PWM. Oscilátory mají možnost nastavení a naladění napěťové škály pomocí trimmerů, které se nacházejí na společné desce. Před montáží a kompletováním jsem naladil tyto oscilátory pomocí trimmeru podle škály 1 V/OCT, to znamená že oscilátory jsou škálově kompatibilní s ostatními přístroji podporujícími CV (napěťové řízení).

Základní princip a popis obvodu:

Pro generování vlny pilového průběhu jsem použil integrovaný obvod typu CD40106 Schmittův klopný obvod s negovaným výstupem v zpětnovazebném zapojení pomocí diody typu 1N4148, která zajišťuje průchod jedním směrem do vstupu. Na vstupu je zapojen kondenzátor o hodnotě 10 nF, uzemněný, který se stará o rychlost kmitání a určuje minimální a maximální frekvenční rozsah, což je v mém případě kolem 1 Hz až 30 kHz. Dále je na vstupu zapojen obvod pro převod lineárního na exponenciální škálu pomocí tranzistoru typů 2N3904 a 2N3906. Tímto obvodem se ovládá, jak rychle se bude kondenzátor vybíjet řízeným napětím. Vstup Schmittova klopného obvodu je vyveden jako výstup signálu a je dále upraven a normalizován pomocí OZ.

Výstup PWM je řešen pomocí OZ v zapojení typu komparátor, který porovnává hodnotu z potenciometru (je zapojen jako dělič napětí), CV a výstupu pilového průběhu ze Schmittova klopného obvodu. Tento výstup z OZ je poté opět normalizován pomocí děliče napětí, kde výstup jde tzv přes „buffer“ a vyveden jako výstup.



Obr. 22: Schematické zapojení VCO užitím IO 40106

2.5.2 LM13700 VCA - transkonduktanční OZ

Podle mého názoru by v syntezátoru neměl také chybět VCA (napěťově řízený zesilovač), jelikož tímto obvodem/blokem můžu udávat, kdy vstupní signál bude hrát či ne, tedy mu určit hlasitost. Bylo by nepříjemné neustále slyšet opakující se tón, který nejsme jinak schopni ztlumit než vypnutím celého přístroje.

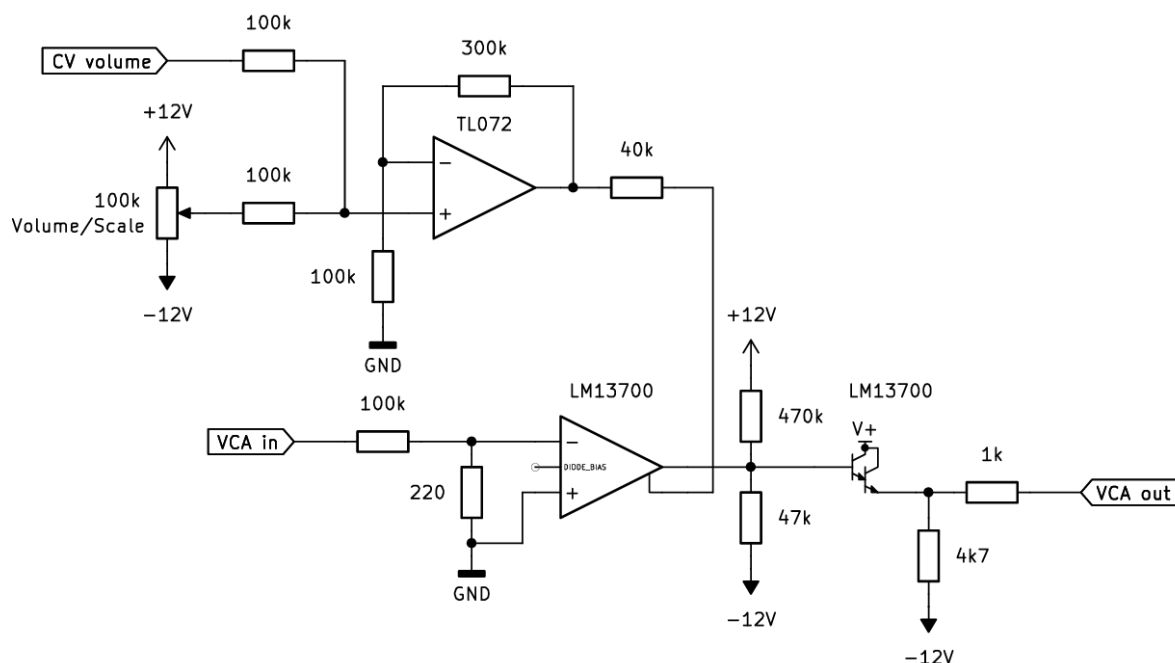
Zde jsem použil speciální typ OZ s názvem „transkonduktanční operační zesilovač“ (OTZ). Jedná se o speciální typ OZ, který je schopen proudem ovládat proudové zesílení, funkce je stejná jako u obyčejných operačních zesilovačů.

Další důležitou vlastností tohoto OTZ je možnost ovládat velikost proudu vycházejícího z výstupu ven. Tento prvek je klíčový a pro použití v syntéze, jelikož se tímto způsobem dá jednoduše vytvořit napětím ovladatelný zesilovač.

Obvod využívá integrovaný obvod LM13700, který v sobě obsahuje dva TOZ s dvěma tranzistorovými buffer'y v Darlingtonově zapojení.

Princip obvodu je následovný:

přicházející vstup „IN“ do OTZ je přiveden přes dělič napětí, který radikálně zeslabuje vstupní signál, protože tento integrovaný obvod v příznivém stavu pracuje s rozdílovými hodnotami mezi vstupem + a - v řádech mV. Následovně výstupní signál OTZ je ovládán OZ TL072, který se stará o napěťový rozsah vstupního CV ovládání a ovládá zesílení či zeslabení výstupního signálu. Tento signál je poté poslán přes tranzistorový buffer v Darlingtonově zapojení a napěťově normalizován pomocí odporů. Výstup je opět v rozsahu 10 Vp-p.



Obr. 23: Schematické zapojení VCA užitím IO LM13700

2.5.3 LM13700 VCF

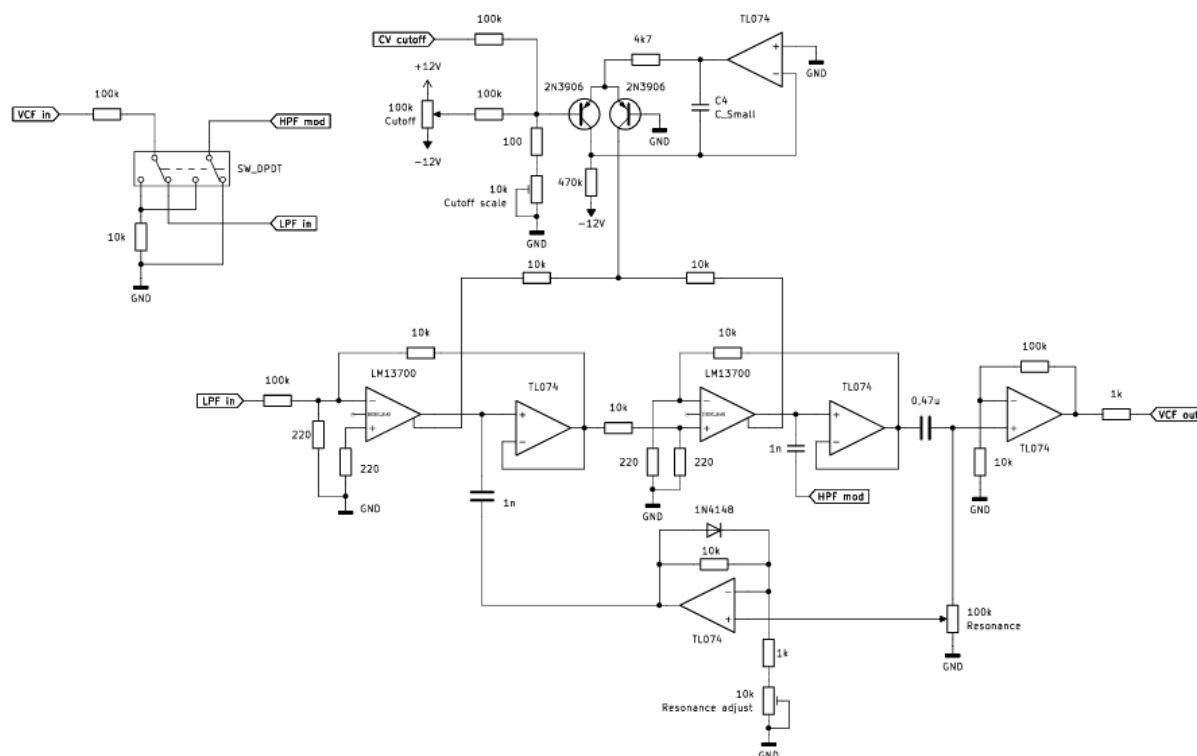
Syntezátor obsahuje dva stejné moduly VCF, s těmito možnostmi: (signal) IN, CV (CUTOFF), OUT, Resonance, CUTOFF.

Při sestavování filtru jsem použil opět OTZ, integrovaný obvod LM13700, který obsahuje dva tyto OTZ, a navíc dva tranzistorové buffer'y v Darlingtonově zapojení (sledovače napětí).

Zjednodušený princip a funkce celého obvodu je následovná:

Vstupní signál je připojen přes dělič napětí do prvního OTZ, kde je velmi zeslaben kvůli vlastnostem IO. Výstup je přiveden do OZ TL074, který převádí přicházející proud na napětí. Výstup OZ je připojen přes další dělič napětí do druhého OTZ, který se stará o filtraci s kondenzátorem 1nF, který je připojený na dvoupólový spínač pro přepínání typu filtru (LPF a HPF). Výstup druhého OTZ je opět přiveden do dalšího OZ převádějící proud (vstup) na napětí (výstup). Výsledek je poté zapojen přes kondenzátor o hodnotě 0,4 μ F pro vycentrování vstupního signálu. Za kondenzátorem je zapojen zpětnovazební obvod užitím OZ TL074, jehož účelem je přidat rezonanci do celkového vstupního signálu. Poslední OZ slouží pro impedanční vyrovnání a správné normalizaci. Napěťový rozsah výstupu je zase 10 Vp-p, pokud není aplikovaná filtrace a rezonance.

Dva OTZ jsou ovládány jedním obvodem, který se stará o správné napěťové ovládání celkového filtru (CUTOFF).



Obr. 24: Schematické zapojení VCF užitím IO LM13700

2.5.4 ICL8038 LFO

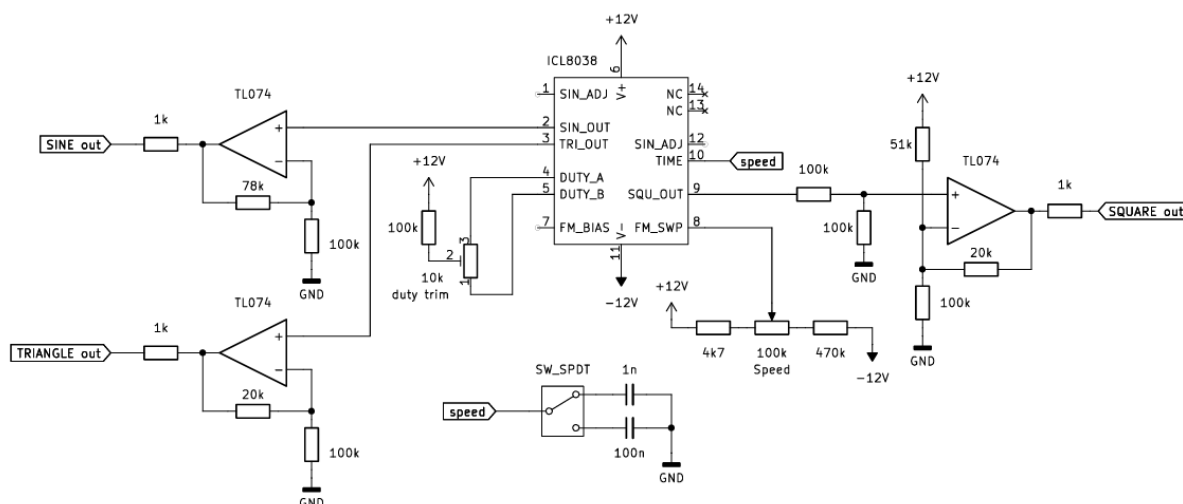
Do mého výrobku jsem implementoval 2x LFO, jelikož mi přišlo smysluplné je využít jak pro VCF, tak pro VCA. Dalším důvodem bylo, že jsem si koupil integrované obvody značené ICL8038, které jsou schopny generovat tři základní průběhy (sinus, pyramida a čtverec) s malým počtem komponentů pro jeho funkci.

Po připojení napájecího napětí je tento integrovaný obvod schopen pracovat nezávisle, stačí pouze zajistit 3 prvky pro jeho oscilaci, což je napájení, zapojení trimmeru mezi piny 4 a 5, určené pro úpravu šířky vlny a na pinu 8 stačí přivést potenciometr či nastavitelný dělič napětí. Nevýhoda tohoto čipu je offset ladicího napětí pro ovládání frekvence.

Zjednodušeně tento obvod funguje následovně:

Integrovaný obvod ICL8038 na pinech 4 a 5 má připojený trimmer pro úpravu šířky vlny, v mém případě jsem nastavil šířku v poměru 50 %. Dále na pinu 8 je zapojený potenciometr o hodnotě 100 k Ω , který je rozsahově nastaven pomocí dvou odporů 4k7 do +12 V a 470 k Ω do -12 V.

Každá vlna má vlastní výstup z IC, tyto vlny bohužel nejsou vycentrované, což znamená, že mají napěťový offset, proto každý výstup jde do OZ, který má specifické hodnoty pro vycentrování tohoto signálu. Napěťový rozsah výstupu z každých vln je zase 10 Vp-p.



Obr. 25: Schematické zapojení LFO užitím IO ICL8038

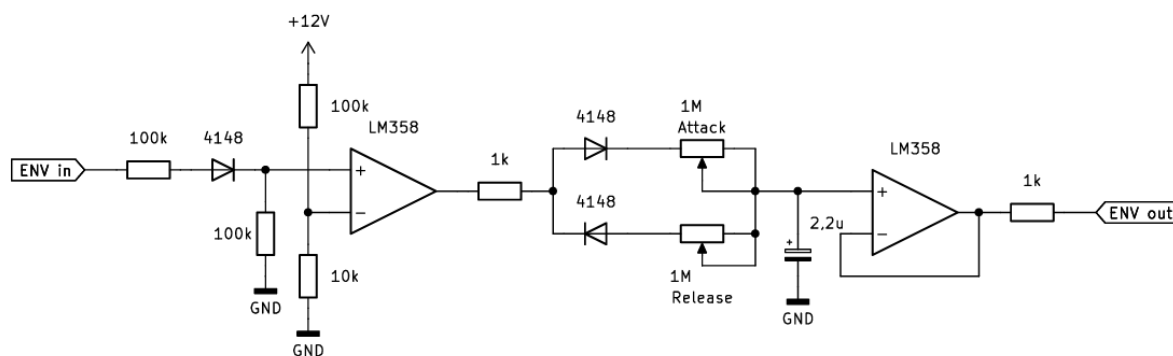
2.5.5 Jednoduchý generátor křivky AR s OZ a kondenzátorem

Uvedený obvod upravuje vstupní GATE signál. Výstupem je upravený vstupní signál, jehož dobu náběhu a spádu je možno měnit. Tento jev se vztahuje k charakteristice kondenzátoru a jeho přechodového děje.

Princip obvodu:

Na vstup je přiveden jakýkoliv signál, běžně se používá GATE či impulz.

Vstupní obvod, jehož obsahem je vstupní odpor 100 k Ω , dioda typu 1N4148 a 100 k Ω připojený k zemi, slouží pro průchod pouze kladných hodnot v rozsahu 0 – 12 V. Poté následuje operační zesilovač typu LM358, který porovnává hodnotu děliče dvou odporů 10 k Ω na zem a 100 k Ω na 12 V (výstup děliče je přibližně 3,7 V) a vstupním signálem. Pokud vstupní signál přesáhne hranici 3,7 V, výstupem OZ je napájecí napětí, tedy 12 V a naopak (0 V). Tento výstup jde poté přes 1 k Ω odpor a přes dvě diody 1N4148, kde každá je zapojena obráceně a navzájem jsou rozdělené. Jsou dále separátně zapojeny k potenciometrům o hodnotě 1M Ω , kde jsou na konci vývodů opět propojeny, tady se nachází kondenzátor o hodnotě 2 μ 2 a připojený k zemi. Toto místo u kondenzátoru je připojeno k druhé straně OZ, který je zapojen v konfiguraci sledovače (buffer), kde na výstupu ještě doprovází ochranný odpor 1 k Ω při připojení omylem k zemi či jinému prvku.



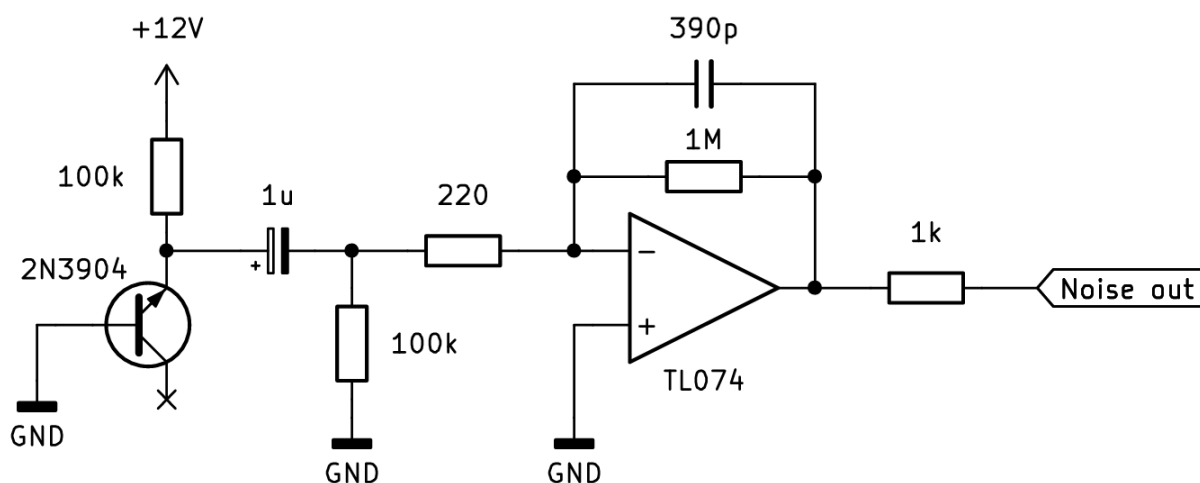
Obr. 26: Schematické zapojení ENV užitím IO LM358

2.5.6 2N3904 NPN tranzistorový generátor šumu s OZ

Můj nápad byl následující: implementovat pouze jeden jednoduchý generátor šumu, který se může využít na vytváření perkusivních zvuků či vytváření syntetické bicí soupravy. Mým záměrem bylo použít syntezátor jako generátor melodie a bicí, kde právě šum hraje hlavní roli pro vytváření výšek.

Princip a popis funkce obvodu je následovný:

Hlavním generátorem tohoto šumu je tranzistor typu 2N3904, který je zapojen jednou stranou 100k odporu k emitoru a druhou stranou k napájení 12 V. Báze tranzistoru je uzemněna a kolektor je ponechán nezapojený. Zjednodušeně: důvodem, proč začne tento obvod generovat šum je, že tranzistor je zapojen v nepříznivé konfiguraci, kde mezi bází a emitorem prochází proud, což vyvolá nestabilitu v propouštění tohoto proudu. Výstupem (mezi emitorem a 100 kΩ odporem) je tedy téměř 12 V a na této hladině je kolísavé napětí ve velmi malém napětovém rozsahu (šum). Tento výstup je poté vycentrován přes derivační členek a následně několikanásobně zesílen OZ v invertujícím zapojení. Rozsah výstupu výsledného šumu je opět 10 V_{p-p}.



Obr. 27: Schematické zapojení generátoru šumu užitím tranzistoru 2N3904

2.5.7 Analogový sequencer s přídavky

Rozhodl jsem se implementovat do syntezátoru dva analogové sequencery, které budou sloužit jako dva způsoby generování, např. pro programování melodií u každého oscilátoru.

Sequencer se neobejde bez určitého tempa/rychlosti, neboli nastavitelného obvodu pro generování hodinového signálu.

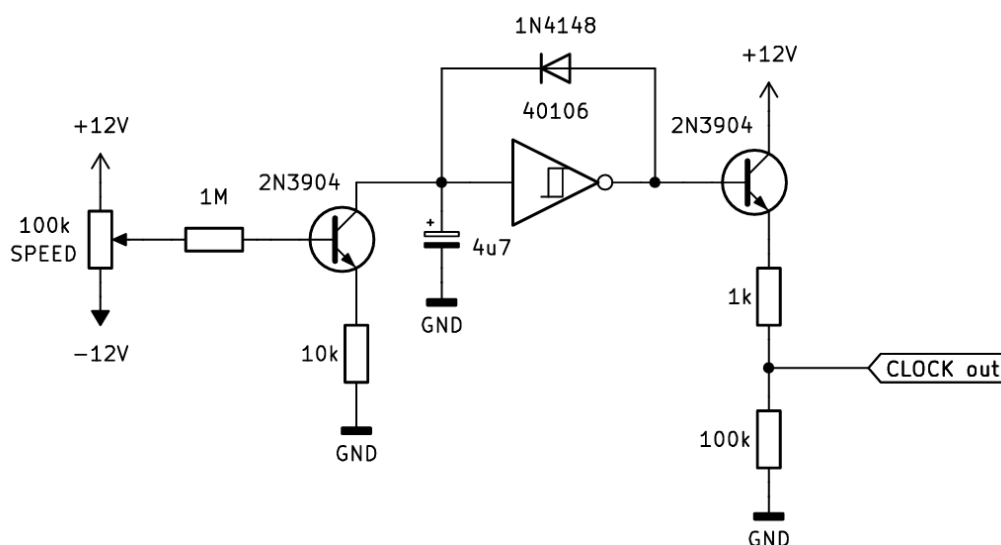
Jako doplněk, který zvýší rozsah melodií, jsem přidal obvod pro dělení frekvence na dvě a čtyři. Toto se dá využít na zpomalení rychlosti sequenceru a tak lze melodiemi pokrýt větší rozsah.

Popis funkce:

Generátor hodinového signálu

Pro generování hodinového impulsu jsem použil stejnou metodu jako u VCO, tedy Shmittovým klopným obvodem IO typu CD40106. Místo kondenzátoru 1nF jsem použil větší 4μ7, který udává nižší frekvenční rozsah. Rychlost (tempo) generátoru je ovládaná pouze jedním potenciometrem, který je zapojen jako dělič napětí, kde tento výstup je připojen přes 1MΩ odpor do báze tranzistoru. Ten se podle vstupní hodnoty začne “otevírat” mezi kolektorem a emitorem a přidává zátěž Schmittovu KO.

Oproti VCO zapojení, které používá vstup KO jako výstupní signál pilového průběhu, je zde vyveden výstup KO, jehož výsledkem je krátký impuls, který je vhodný pro tuto aplikaci. Nakonec je tento signál přiveden do tranzistorového buffer'u a z něj na výstup.



Obr. 28: Schematické zapojení generátoru hodin užitím IO 40106

Dvojitý analogový sequencer

Pro tento obvod jsem využil integrovaný obvod typu CD4017. Jedná se o čítač, který počítá vstupní hodinové signály a tím se posouvá vysoká hodnota (HI, v mém případě 12 V) od první pozice pin 3–0 až do poslední pozice pin 11–9. Takto má celkově 10 kroků, po kterých se hodnota může posouvat.

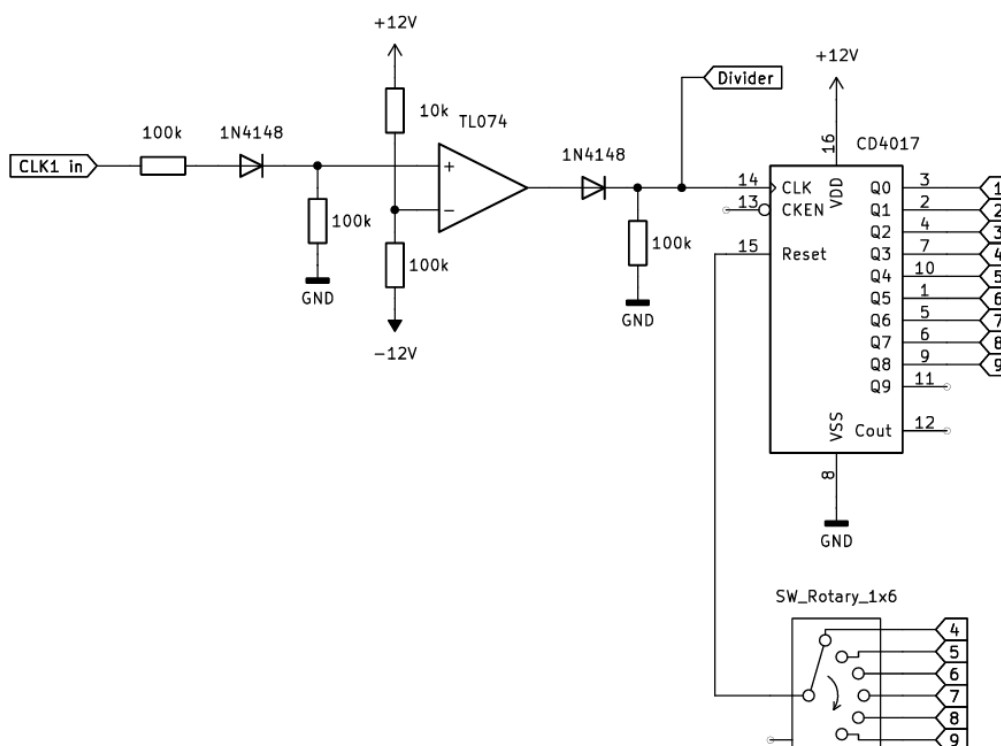
Tato funkce se dá dobře uplatnit ve výrobě jednoduchého analogového sequenceru.

Vstup obvodu je ošetřen proti jakémukoliv negativnímu napětí, kde je dále zesílen pomocí komparátoru typu TL074. Zde jsem musel využít tento OZ, jelikož v obvodě s IO byly k dispozici volné OZ, není to sice nejlepší způsob, ale šetřil jsem místem. Výstup je připojen do vstupu IO CD4017 přes obvod, který propouští pouze kladné napětí. Důvodem je, že IO CD4017 je náchylný na negativní napětí, což může tento čip zničit.

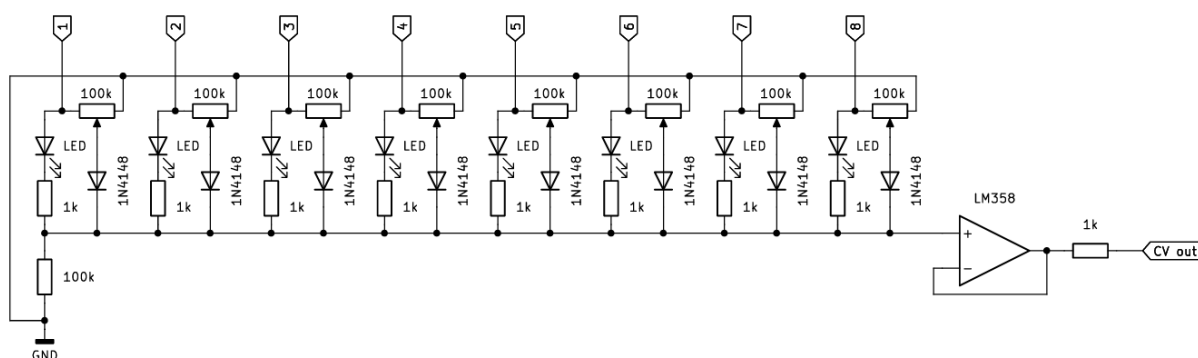
Sekvencer obsahuje možnost volby délky počtu kroků od 3 do 8 plných kroků. Tato funkce je zajištěna přivedením vysoké hodnoty (HI), která v tomto okamžiku resetuje celkový běh sekvenceru od začátku, pomocí šestipólového přepínače připojeného k pinům 4 až 9.

Pro sekvencer 1 jsem doplnil možnost nastavení počtů kroků, od 3 do plných 8 kroků.

Sekvencer 2 vychází stejně jako u schématu sekvenceru 1 kromě možnosti nastavení počtu kroků a je doplněn GATE OUT výstupy pro separátní kroky.



Obr. 29: Schematické zapojení vstupní části a reset sekvenceru 1 užitím IO CD4017 – část 1

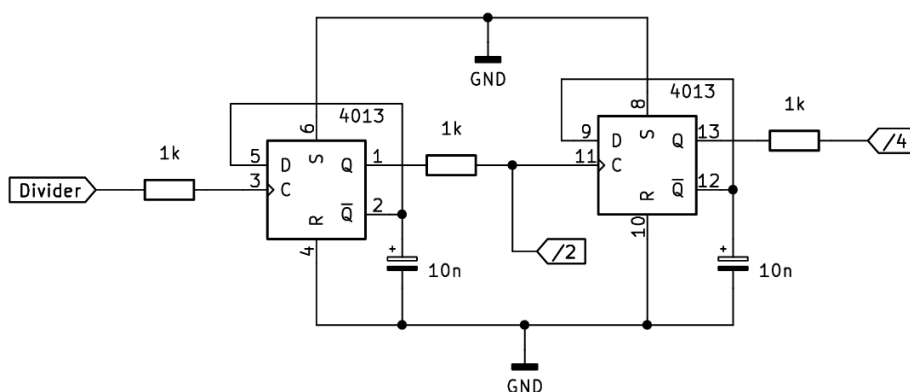


Obr. 30: Schematické zapojení jednotlivých kroků sekvenceru 1 užitím IO CD4017 – část 2

Funkce tohoto obvodu: na každý výstup pinů od 3 do 6 IO CD4017 se zapojí potenciometr jako dělič napětí, kde se potenciometrem může nastavovat libovolná hodnota pro jednotlivý krok v rozsahu 0 – 12 V. Obvod je poté ošetřen diodami, aby nedošlo ke zkratu mezi piny IO. Poté všechny tyto jednotlivé výstupy IO jsou spojeny dohromady, dále ještě uzemněny odporem 100 k Ω , a připojeny do vstupu buffer'u, kde z výstupu poté vychází sekvence. Doplnkem jsou LED diody vizualizující, kde se právě používá krok nachází.

Dělič frekvence dvěmi a čtyřmi

Tento obvod využívá integrovaný obvod CD4013, který obsahuje dva D-KO. Tyto dva klopné obvody slouží jako děliče frekvence, kde první D-KO dělí vstupní signál dvěmi. Tento výstup je následovně zapojen do druhého D-KO, kde výstupem je signál dělený čtyřmi.



Obr. 31: Schematické zapojení děliče frekvence užitím IO CD4013

ZÁVĚR

V teoretické části jsem popsal a vysvětlil základní pojmy a funkčnost základních bloků syntezátoru včetně fotografických podkladů. Celá kapitola je napsaná tak, aby byl i začátečník schopen pochopit základní pojmy a funkce syntezátoru.

V praktické části jsem podrobně popsal funkci jednotlivých bloků a obvodů, které tvoří součást mého vlastního projektu. Výsledkem mé práce je zhotovený analogový modulární syntezátor, jenž je určen především pro vlastní hudební produkci nebo jako vzdělávací pomůcka pro tvorbu zvukových podkladů.

Tuto práci jsem zpracoval se záměrem spojit můj vlastní projekt s možností jeho představení v rámci školy a sdílení s ostatními zájemci o toto téma.

3 SEZNAM ZKRATEK

VCO	napětově ovládaný oscilátor - „voltage controlled oscillator“
VCF	napětově ovládaný filtr - „voltage controlled filter“
VCA	napětově ovládaný zesilovač - „voltage controlled amplifier“
LFO	nízkofrekvenční oscilátor - „low frequency oscillator“
ENV	generátor křivky – „Envelope“
AR	slovné spojení „Attack“ a „Release“ (AR)
OZ	operační zesilovač – „operational amplifier“
OTZ	transkonduktanční operační zesilovač – „operational transconductance amplifier“
KO	klopný obvod – „Flip-flop circuit“
IO	integrovaný obvod – „integrated circuit“
CV	napětové ovládání – „control voltage“
GATE	signál, který nabývá dvou hodnot
LED	elektroluminiscenční dioda – „light emitting diode“
pin	vývod z integrovaného obvodu s číselnou specifikací
buffer	obvod pro impedanční přizpůsobení mezi vstupem a výstupem
„normalizace“	napětová normalizace střídavého signálu (10 Vp-p)

4 POUŽITÁ LITERATURA

DIY SYNTH PSU: How to design a simple dual power supply. In: *Youtube*[online]. [cit. 2020-11-16]. Dostupné z:

https://www.youtube.com/watch?v=pQKN30Mzi2g&ab_channel=MoritzKlein

Designing a white, pink & blue noise generator from scratch. In: *Youtube*[online]. [cit. 2022-7-4]. Dostupné z:

https://www.youtube.com/watch?v=0yB_h_wFkh4&t=659s&ab_channel=MoritzKlein

DIY VCO Part 1: The analog oscillator core anyone can build. In: *Youtube*[online]. [cit. 2022-7-4]. Dostupné z:

https://www.youtube.com/watch?v=QBatvo8bCa4&t=727s&ab_channel=MoritzKlein

Ray Wilson, Music from outer space. Dostupné z:

<https://musicfromouterspace.com/>

The History of Synths!. Dostupné z:

<https://www.historyofsynths.com/>

Musical Instruments Museum. Dostupné z:

<https://www.mim.be/en/collection-piece/theremin-0>

Deep signal studios. Dostupné z:

<https://www.deepsignalstudios.com/inventory/vintage-synthesizer-keyboard/yamaha-dx7>

5 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Starý hudební nástroj – těremin

Obr. 2: Elektronický hudební nástroj Yamaha DX7

5.1 Ukázkové průběhy na osciloskopu

Obr. 3: Ukázka výstupu pilového průběhu

Obr. 4: Ukázka PWM výstupu s cca 20 % dobou spínání

Obr. 5: Ukázka PWM výstupu s cca 50 % dobou spínání

Obr. 6: Ukázka PWM výstupu s cca 80 % dobou spínání

Obr. 7: Ukázka amplitudové modulace pilového průběhu

Obr. 8: Ukázka výstupu LPF filtru se vstupním signálem pilového průběhu bez rezonance

Obr. 9: Ukázka výstupu LPF filtru se vstupním signálem pilového průběhu s rezonancí

Obr. 10: Ukázka výstupu HPF filtru se vstupním signálem pilového průběhu bez rezonance

Obr. 11: Ukázka výstupu HPF se vstupním signálem pilového průběhu s rezonancí

Obr. 12: Ukázka šumu

Obr. 13: Ukázka výstupu LFO se sinusovým průběhem

Obr. 14: Ukázka výstupu LFO se trojúhelníkovým průběhem

Obr. 15: Ukázka výstupu LFO s čtvercovým průběhem

Obr. 16: Ukázka vstupu GATE (nahore) a výstupu ENV (dole)

Obr. 17: Ukázka CV výstupu ze sekvenceru – v. 1

Obr. 18: Ukázka CV výstupu ze sekvenceru – v. 2

Obr. 19: Ukázka modulace VCO pilového průběhu s LFO se sinusovým průběhem

Obr. 20: Ukázka CUTOFF modulace LFO se sinusovým průběhem

5.2 Schematická zapojení

Obr. 21: Schematické zapojení bipolárního zdroje AC-DC ± 12 V

Obr. 22: Schematické zapojení VCO užitím IO 40106

Obr. 23: Schematické zapojení VCA užitím IO LM13700

Obr. 24: Schematické zapojení VCF užitím IO LM13700

Obr. 25: Schematické zapojení LFO užitím IO ICL8038

Obr. 26: Schematické zapojení ENV užitím IO LM358

Obr. 27: Schematické zapojení generátoru šumu užitím tranzistoru 2N3904

Obr. 28: Schematické zapojení generátoru hodin užitím IO 40106

Obr. 29: Schematické zapojení vstupní části a reset sekvenceru 1 užitím IO CD4017 – část 1

Obr. 30: Schematické zapojení jednotlivých kroků sekvenceru 1 užitím IO CD4017 – část 2

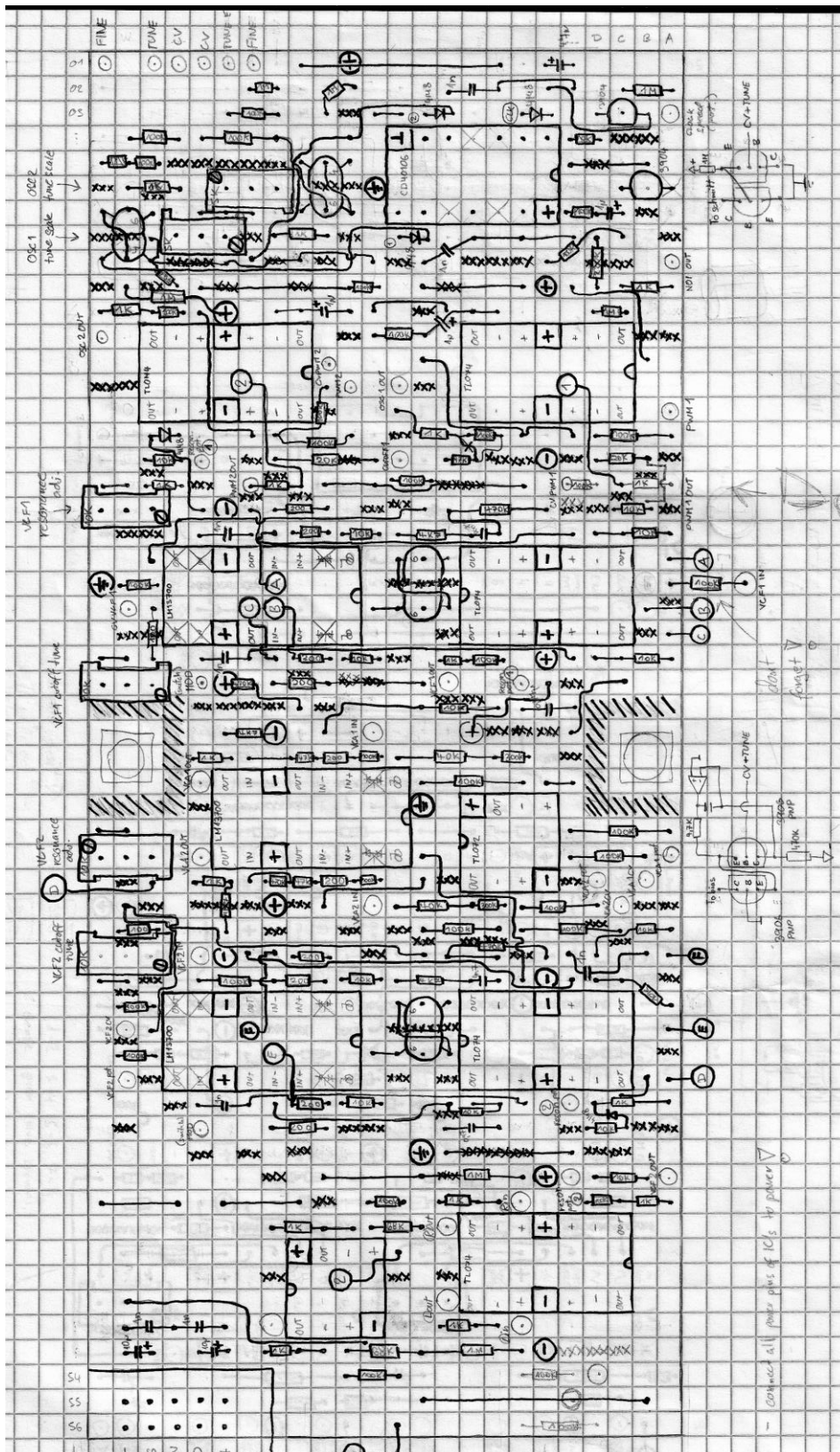
Obr. 31: Schematické zapojení děliče frekvence užitím IO CD4013

6 SEZNAM PŘÍLOH

- I. Pohled shora na schematické zapojení obvodu na první děrnou desku (stripboard) s obsahem napěťově ovládaných modulů a generátorů zvuku
- II. Pohled shora na schematické zapojení obvodu na druhou děrnou desku (stripboard) s obsahem řídicích modulů (obvodů)
- III. Ukázka zhotoveného výrobku

7 PŘÍLOHY

- I. Pohled shora na schematické zapojení bloků na první děrnou desku (stripboard) s obsahem napětově ovládaných modulů a generátorů zvuku



III. Ukázka zhotoveného výrobku

