

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY
A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení světelných efektů audio signálem

Light effects controlled by audio signal

Autor práce: Filip Sauer

Vedoucí práce: Ing. Jan Broulím

Plzeň 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip SAUER**
Osobní číslo: **E12B0401P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Řízení světelných efektů audio signálem**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Prostudujte možnosti řešení řízení světelných efektů na základě audio signálu.
2. Porovnejte varianty analogového a digitálního řešení.
3. Vybrané řešení realizujte a demonstруйте na konkrétní aplikaci.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Broulím

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací světelného efektu řízeného audio signálem, nazývaného barevná hudba. Shrnuje potřebné informace pro realizaci, jako jsou například možnosti realizace a vlastnosti frekvenčních filtrů. Na základě těchto informací jsou vybrány Sallen-Key filtry a zapojení navrženo a realizováno. Práce je podpořena simulacemi filtrů a měřeními na reálné aplikaci.

Klíčová slova

frekvenční filtr, světelný efekt, barevná hudba, horní propust, dolní propust, pásmová propust, pásmová zadrž, Sallen-Key

Abstract

This bachelor work describes the design and the realization of lighting effects-driven audio signal, called color music. information needed for realization is summarized, possible ways of the realization and properties of frequency filters. Sallen-Key filters are chosen and designed according to the requirements of the application. It is supported by simulations and measurements of filters on a real application.

Keywords

frequency filter, light efect, color music, low pass, high pass, band pass, band stop, Sallen-Key

Prohlášení

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

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

.....
Podpis

V Plzni dne 1. 6. 2015

Filip Sauer

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Broulímovi za odborné rady a pomoc při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům a přátelům za podporu při studiu.

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratk	ix
1 Úvod	1
1.1 Řízení světelných efektů audio signálem	1
1.2 Možnosti realizace	4
1.2.1 Princip realizace	4
1.2.2 Analogová možnost realizace	4
1.2.3 Realizace pomocí speciálních integrovaných obvodů . .	5
1.2.4 Digitální možnost realizace	5
1.3 Frekvenční filtry	5
1.3.1 Vlastnosti filtrů	5
1.3.2 Dělení filtrů	6
1.3.3 Pasivní filtry	6
1.3.4 Aktivní filtry	7
1.3.5 Dělení podle vlastností	7
1.3.6 Základní parametry filtrů	10
1.4 Popis zapojení Sallen-Key	11
2 Praktická část	13
2.1 Volba parametrů filtrů	13
2.1.1 Volba mezních frekvencí	13
2.1.2 Volba činitele jakosti	14

2.1.3	Volba řádu filtru	14
2.2	Volba součástek	15
2.2.1	Volba rezistorů	15
2.2.2	Volba kondenzátorů	15
2.2.3	Volba aktivních prvků	15
2.3	Návrhy filtrů	16
2.3.1	Návrh dolní propusti	16
2.3.2	Návrh horní propusti	17
2.3.3	Návrh pásmové propusti	19
2.4	Simulace filtrů	20
2.5	Popis zařízení	23
2.6	Návrh plošného spoje	24
2.7	Měření	26
2.8	Použité součástky	27
3	Závěr	29

Seznam obrázků

1.1	Princip jednoduchého laserového projektoru	3
1.2	Princip vychylovacího systému X-Y laserového projektoru . . .	3
1.3	Příklad zapojení pomocí indikátoru vybuzení	5
1.4	Příklad pasivního filtru typu HP	7
1.5	Ideální filtr dolní propust	8
1.6	Ideální filtr horní propust	8
1.7	Ideální filtr pásmová propust	9
1.8	Ideální filtr pásmová zádrž	10
1.9	Schéma dolní propusti Sallen-Key	11
2.1	Frekvenční rozsah hudebních nástrojů s vyznačenými frekvencemi filtrů	14
2.2	Vnitřní uspořádání IO TLC272CP	16
2.3	Schéma DP Sallen-Key	17
2.4	Schéma HP Sallen-Key	18
2.5	Schéma PZ Sallen-Key	19
2.6	Simulace DP Sallen-Key $f_0=105,5$ Hz	21
2.7	Simulace HP Sallen-Key $f_0=9068,7$ Hz	22
2.8	Simulace PP Sallen-Key $f_r=1717,6$ Hz	23
2.9	Schéma kompletního zařízení	24
2.10	Návrh plošného spoje s osazením součástek	25
2.11	Spodní strana plošného spoje	25

Seznam tabulek

2.1	Naměřené hodnoty	26
2.2	Použité součástky	27

Seznam symbolů a zkratek

OZ - Operační zesilovač

IO - Integrovaný obvod

HP - Horní propust

DP - Dolní propust

PP - Pásmová propust

PZ - Pásmová zadrž

f_0 - Mezní frekvence pro horní a dolní propust

f_{m1}, f_{m2} - Mezní frekvence pro pásmovou propust a zadrž

f_r - Rezonanční frekvence pro pásmovou propust a zadrž

B - Šířka pásma

Q - Činitel jakosti

K - Přenos

E12 - Výrobní řada součástek

E24 - Výrobní řada součástek

DC - Stejnoseměrné napětí

1

Úvod

Cílem této práce je navrhnout a realizovat světelný efekt řízený audio signálem. Světelný efekt je řízen frekvencí audio signálu, který na základě fyziologie vnímání zvuku člověkem rozdělujeme na výšky, středy a basy. Realizace je provedena analogovými prvky. Zapojení vstupních filtrů je realizováno pomocí topologie Sallen-Key, která využívá operačních zesilovačů (dále jen OZ). Práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou stručně popsány druhy používaných světelných efektů, dále možnosti realizace konkrétního efektu barevná hudba. Následují vlastnosti frekvenčních filtrů (dále jen filtrů), jejich rozdělení, popis a funkce jednotlivých druhů filtrů, jako jsou dolní propust, horní propust, pásmová propust a pásmová zadrž. Dále jsou rozebrány parametry frekvenčních filtrů a popis struktury Sallen-Key. V praktické části je popsán návrh konkrétních frekvenčních filtrů doplněný o výpočty. Následuje simulace navržených filtrů k ověření správnosti návrhů. Návrh zařízení včetně plošného spoje a výsledků měření na reálné aplikaci je popsán v následujících kapitolách. V závěru jsou shrnuty výsledky a poznatky, které jsou syntézou všech předchozích kapitol a je diskutována možnost rozvinutí.

1.1 Řízení světelných efektů audio signálem

Světelných efektů řízených audio signálem je na trhu velké množství, které zahrnuje: stroboskopy, laserové projektory, grafické ekvalizéry a různé ba-

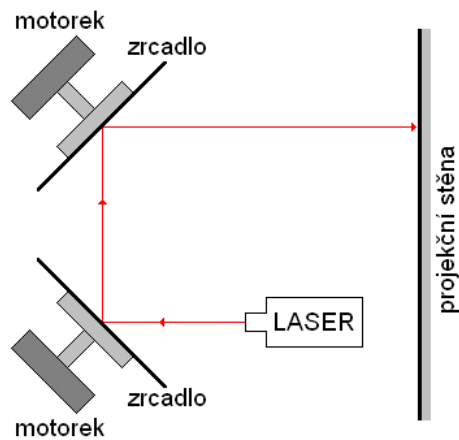
revné efekty.

Stroboskopy

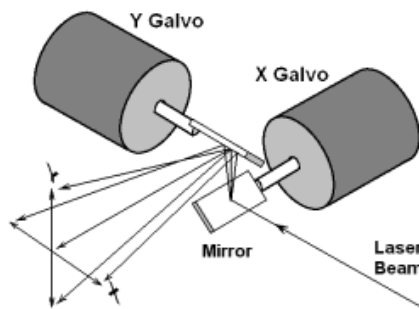
Stroboskopy jsou světelná zařízení, která v krátkém časovém intervalu dokáží vyprodukovat velké množství světelných záblesků. Je-li frekvence těchto záblesků dobře sladěna s pohybem osob, které osvětluje, může se nám pohyb tanečníků jevit jako přerušovaný nebo velmi zpomalený. Stroboskopy můžeme rozdělit na výbojkové a v LED provedení.

Laserové projektory

Laserové projektory mohou vykreslovat různé obrazce, které vznikají vychylováním laserového paprsku. Nejjednodušším principem jsou dvě zrcátka připevněná na osy dvou motorů (viz obr. 1.1). Zrcátko na ose motoru je připevněno pod určitým úhlem nebo vibruje. Změnou frekvence vibrací nebo změnou rychlosti otáček motorů vytváří různé kulaté obrazce podobné Lissajousovým obrazcům. Složitější a více používané laserové projektory fungují na principu vychylování zrcátek v osách X a Y a případném doplnění o různé optické filtry, které rozptýlí laserový paprsek. Vychylovací mechanismus je znázorněn na obrázku 1.2. Osy naklápěcího zařízení, dnes nejčastěji používané galvanometry, jsou namontované k sobě v kolmém úhlu. Laserový paprsek je odražen od zrcátek namontovaných na osách galvanometrů. Paprsek dopadne na zrcátko scanneru představující souřadnici X a je odražen na zrcátko představující souřadnici Y, poté je zobrazen na promítacím místě. Směr paprsku může být ovlivňován kombinací úhlů zrcátek.



Obrázek 1.1: Princip jednoduchého laserového projektoru



Obrázek 1.2: Princip vychylovacího systému X-Y laserového projektoru

Grafické ekvalizéry

Grafické ekvalizéry reagují na úroveň vstupního signálu (hlasitosti) rozsvícením příslušného segmentu zařízení.

Barevné efekty

Zařízení světelného efektu je obvykle nazýváno barevná hudba (dále jen barevná hudba). Barevná hudba bliká pro různé frekvence různou barvou, často jsou voleny tři barvy - pro výšky, středy a basy. Zmiňovaný světelný efekt je tématem této bakalářské práce.

1.2 Možnosti realizace

Barevná hudba slouží k rozšíření reprodukované hudby o další vjem, kterým je vizuální efekt. Dříve se barevná hudba realizovala pomocí výkonových prvků napájených ze sítě 230 V. K zobrazení sloužily žárovky, většinou o příkonu 200 W. S vývojem nových technologií, dostupností moderních součástek a integrovaných obvodů vznikalo mnoho nových způsobů realizace. V dnešní době se setkáváme s číslicovými druhy realizací, které oproti analogovým nabízí větší škálu efektů. S hudebními světelnými efekty se můžeme nejčastěji setkat na hudebních akcích a v tanečních klubech [2].

1.2.1 Princip realizace

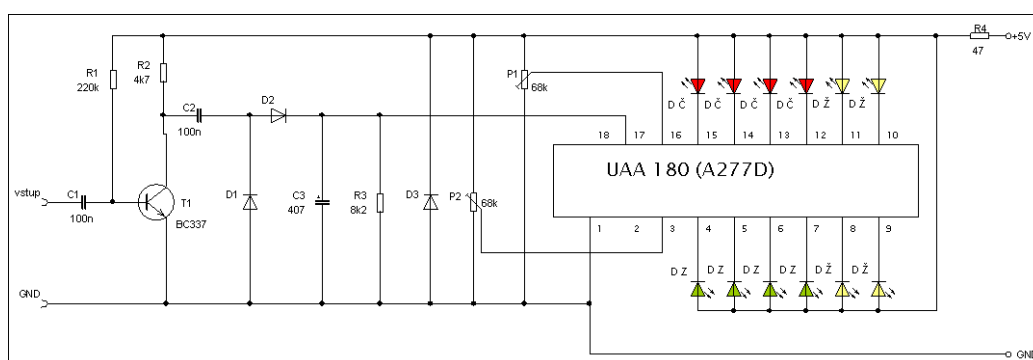
Základní princip realizace barevné hudby spočívá v rozdělení vstupního analogového signálu, nejčastěji přímo z výstupu audio zařízení nebo mikrofonem, do frekvenčních pásem, například výšky, středy, hloubky. Každé frekvenční pásmo se přiřadí k světelnému zdroji jiné barvy. Výsledný efekt se projeví změnou barvy osvětlení podle toho, jestli dané frekvenční pásmo obsahuje vstupní signál. Počet frekvenčních pásem a barvy efektů záleží na konstruktérovi. Často se také používá „inverzní světlo“, které vyplňuje prázdné okamžiky při blikání a je zapojeno inverzně ke střednímu pásmu [5].

1.2.2 Analogová možnost realizace

Princip analogové možnosti realizace spočívá v rozdělení vstupního signálu do frekvenčních pásem. K rozdělení do pásem slouží filtry, které mohou být pasivní nebo aktivní. Pasivní filtry obsahují pouze pasivní součástky (rezistor, kondenzátor, cívku) a jejich přenos nebude nikdy vyšší než 1. Aktivní filtry obsahují zesilovací prvky, jako jsou operační zesilovače, které mohou mít libovolný přenos. Spínání světelných prvků se realizuje nejčastěji pomocí tranzistorových obvodů.

1.2.3 Realizace pomocí speciálních integrovaných obvodů

Cíleného efektu lze docílit pomocí indikátorů vybuzení, jako jsou například integrované obvody UAA180 [10], A277D [11] a další. Před integrovaný obvod (dále jen IO) se zapojí měnič frekvence-napětí a dále IO měří vstupní napětí a podle jeho velikosti je rozsvícena příslušná dioda. Příklad zapojení je uveden na obr. 1.3.



Obrázek 1.3: Příklad zapojení pomocí indikátoru vybuzení

1.2.4 Digitální možnost realizace

Digitální možnost realizace je založena na analogově-digitálním převodu. Diskrétní signál reprezentován binárním kódem je pak dále zpracováván. Ke zpracování digitálního signálu lze použít číslicové logické obvody nebo dnes rozšířené programovatelné mikroprocesory, které nabízejí velké množství realizací. V těchto aplikacích se často využívá Fourierovy transformace, která dokáže převést spojitý signál z časové oblasti do frekvenční oblasti.

1.3 Frekvenční filtry

1.3.1 Vlastnosti filtrů

Frekvenční filtry jsou lineární elektrické obvody s širokým využitím v elektronice a elektrotechnice. Jejich hlavní úkol je výběr frekvenčních složek

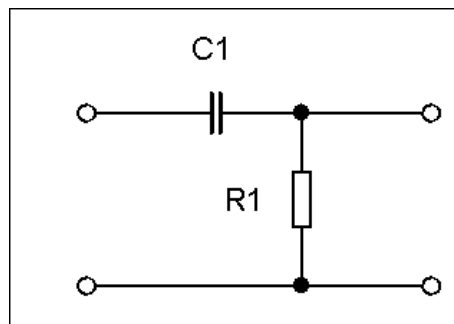
vstupního signálu podle frekvence, na kterou byly navrženy. Frekvenční pásmo, které jsou filtry schopny propustit, nazýváme propustné pásmo. Pásmo, které filtry nepropustí, nazýváme nepropustné pásmo. Často jsou tyto vlastnosti vyjadřovány graficky, pomocí modulové (amplitudové) kmitočtové, popřípadě i fázové kmitočtové charakteristiky. Modulová kmitočtová charakteristika ukazuje zesílení nebo amplitudu v závislosti na frekvenci vstupního signálu. Frekvenční filtry jsou základní stavební prvky pro zpracování signálů. Pásmová propust se v radiotechnice používá jako vstupní obvod pro výběr přijímaných signálů. Horní a dolní propust se používají v anténních obvodech a předzesilovačích pro rozdělení kmitočtových pásem. Pásmová zadrž se používá pro odstranění rušivého signálu. Frekvenční filtry jsou hojně používány i v telekomunikacích. Nedílnou součástí bývají také v elektroakustice jako korekční filtry hloubek, výšek atd. Dolní, horní a pásmové propusti se používají jako výhybky reproduktorů. Dále se s frekvenčními filtry můžeme setkat v měřicí technice. Nejčastěji jako selektivní filtry pro výběr měřeného frekvenčního pásma u selektivních voltmetrů, měřičů zkreslení atd. Při akustických měření se používají váhové filtry, které upravují zvuk podle modelu lidského ucha. V silnoproudé elektrotechnice nachází uplatnění odrušovací filtry. Dolní propust se používá v aplikacích pro převod analogového signálu na digitální jako antialiasingový filtr [3].

1.3.2 Dělení filtrů

Frekvenční filtry dělíme podle použitých součástek na pasivní a aktivní. Dále podle jeho vlastností na horní propust, dolní propust, pásmovou propust a pásmovou zadrž.

1.3.3 Pasivní filtry

Tyto filtry jsou složeny z pasivních součástek typu rezistor, kondenzátor a cívka. Výhodami těchto filtrů jsou jednoduchost a absence napájení. Nevýhodami těchto filtrů jsou maximálně jednotkový přenos, malý činitel jakosti a obtížné kaskádní skládání.



Obrázek 1.4: Příklad pasivního filtru typu HP

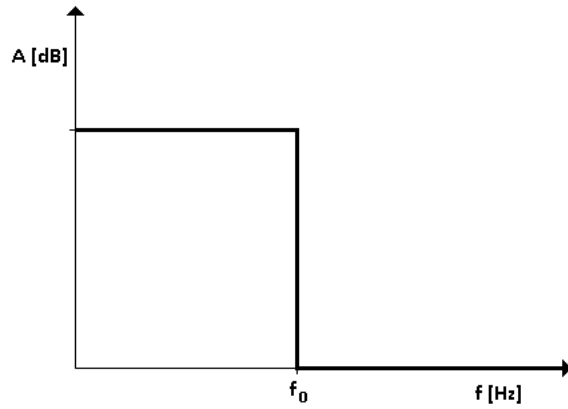
1.3.4 Aktivní filtry

Tyto filtry obsahují kromě pasivních součástí také aktivní prvky, například operační zesilovače. Pasivní prvky zapojené ve zpětné vazbě určují řád filtru. Mezi nejpoužívanější zapojení patří topologie Sellen-Key, využívající operační zesilovače. Mezi výhody zahrnujeme velký činitel jakosti a dobré vlastnosti pro kaskádní syntézu. Naopak mezi nevýhody řadíme vyšší cenu a potřebu napájení OZ.

1.3.5 Dělení podle vlastností

Dolní propust

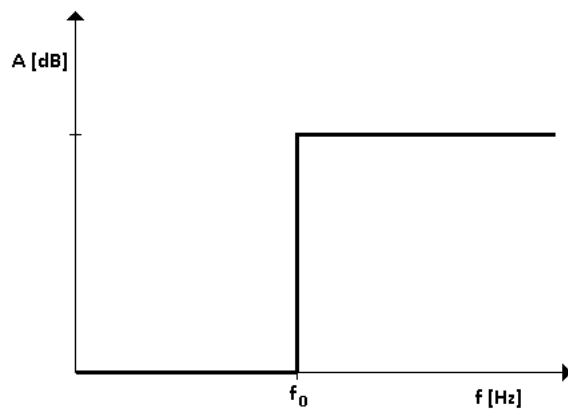
Idealizovaná dolní propust (DP) propouští pouze složky signálu s menší frekvencí než je mezní frekvence f_0 (viz obr. 1.5).



Obrázek 1.5: Ideální filtr dolní propust

Horní propust

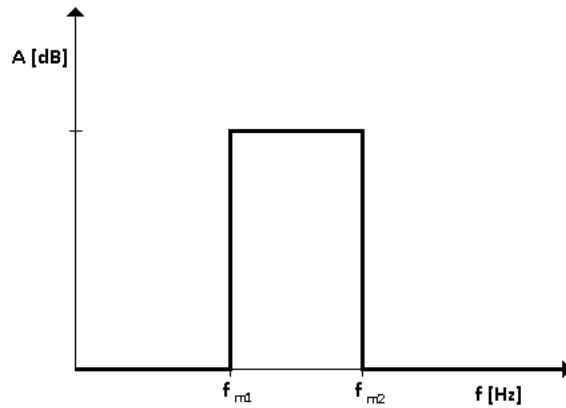
Idealizovaná horní propust (HP) propouští pouze složky signálu s větší frekvencí než je mezní frekvence f_0 (viz obr. 1.6).



Obrázek 1.6: Ideální filtr horní propust

Pásmová propust

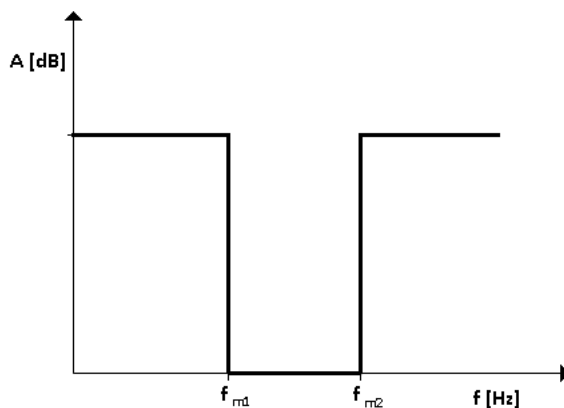
Idealizovaná pásmová propust (PP) propouští pouze složky signálu mezi horní mezní frekvencí f_{m2} a spodní mezní frekvencí f_{m1} (viz obr. 1.7).



Obrázek 1.7: Ideální filtr pásmová propust

Pásmová zadrž

Idealizovaná pásmová zadrž (PZ) nepropouští složky signálu mezi horní mezní frekvencí f_{m2} a spodní mezní frekvencí f_{m1} (viz obr. 1.8).



Obrázek 1.8: Ideální filtr pásmová zádrž

1.3.6 Základní parametry filtrů

Mezní frekvence

Při mezní frekvenci nastává pokles přenosu o 3 dB. Mezní frekvenci lze nastavit správným zvolením hodnot určitých součástí podle způsobu zapojení.

Činitel jakosti filtru

Činitel jakosti Q udává poměr ztrát v rezonančním obvodu filtru. Čím menší ztráty, tím vyšší činitel jakosti Q . V cívkách dochází ke ztrátám kvůli odporu vodiče, kterým jsou navinuty. Tento odpor je vyšší při průchodu střídavým proudem než při průchodu stejnosměrným vlivem skin efektu. U kondenzátorů mají nejvyšší vliv na ztráty ztráty v dielektriku, které jsou dány použitým dielektrikem [4].

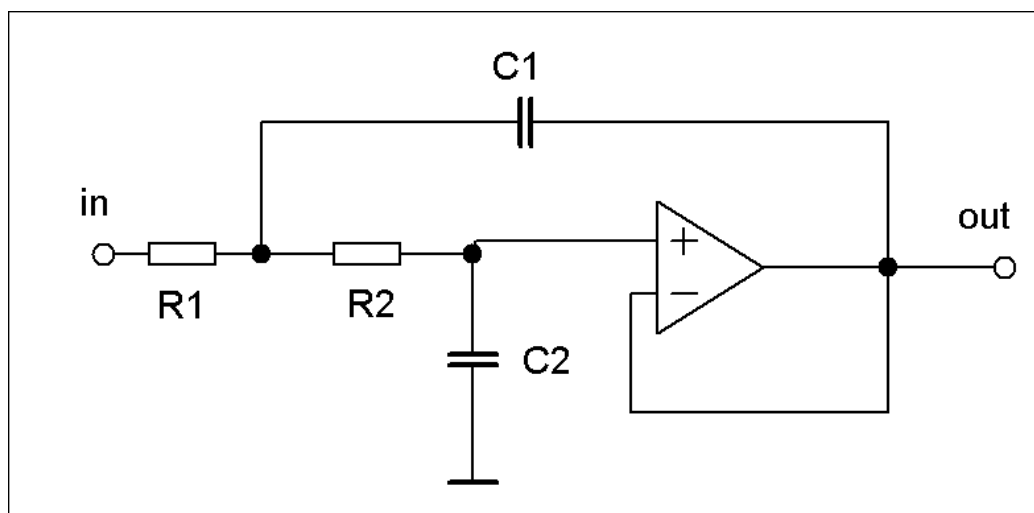
Řád filtru

Řád filtru určuje strmost přenosové funkce při přechodu z propustného pásma do pásma nepropustného a naopak. Čím vyšší je řád filtru, tím se jeho charakteristika blíží ideálnímu filtru a dále roste potlačení přenosu v nepropustném

pásmu. S rostoucím řádem filtru však roste jeho složitost a cena, proto je potřeba správně zvolit řád filtru podle požadavků pro danou aplikaci [3].

1.4 Popis zapojení Sallen-Key

Struktura Sallen-Key je jednou z možností zapojení aktivních analogových kmitočtových filtrů. Lze ji zapojit jako dolní propust, horní propust a pásmovou propust. Aktivní dolní propust se skládá ze dvou rezistorů R1 a R2, dvou kondenzátorů C1, C2 a zesilovače napětí. Zesilovač je reprezentován operačním zesilovačem v neinvertujícím zapojení. V mém případě jsem zvolil zesilovač s jednotkovým zesílením, takže se operační zesilovač chová jako téměř ideální sledovač napětí.



Obrázek 1.9: Schéma dolní propusti Sallen-Key

$$K(p) = \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2 p^2 + (R_1 + R_2) C_2 p + 1} = \frac{K_0 \omega_p^2}{p^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} p + \omega_p^2} \quad (1.1)$$

Funkci zapojení lze zjednodušeně popsat ve třech základních kmitočtových oblastech. Na nízkých kmitočtech se kondenzátory C1 a C2 jeví jako rozpojený obvod (mají velkou impedanci) a vstupní signál je pouze převeden sledovačem na výstup. V okolí mezní frekvence mají kondenzátory impedanci

přibližně stejného řádu jako rezistory R1, R2 a signál je pomocí kladné zpětné vazby přes kondenzátor C1 zesílen podle nastavené hodnoty jakosti Q .

Na vysokých kmitočtech se kondenzátory chovají jako zkrat (malá impedance), takže se signál na vstupu OZ blíží nule a je dále přenesen sledovačem na výstup. Kmitočtové vlastnosti dolní propusti Sallen-Key jsou značně závislé na frekvenčních parametrech použitého operačního zesilovače. Mezi nimi má na chování dolní propusti největší vliv nenulový výstupní odpor operačního zesilovače označený jako R_{out} OZ a projeví se deformací přenosu zejména v oblasti vyšších kmitočtů. Amplitudovou kmitočtovou charakteristiku lze popsat pomocí několika parametrů – přenos v propustném pásmu K_0 , maximum přenosu na kmitočtu pólu $K_{max} = K_{(p)}$, jakost pólu Q_p , minimum přenosu K_{min} , kmitočet minima přenosu f_{Kmin1} a dalších [7].

2

Praktická část

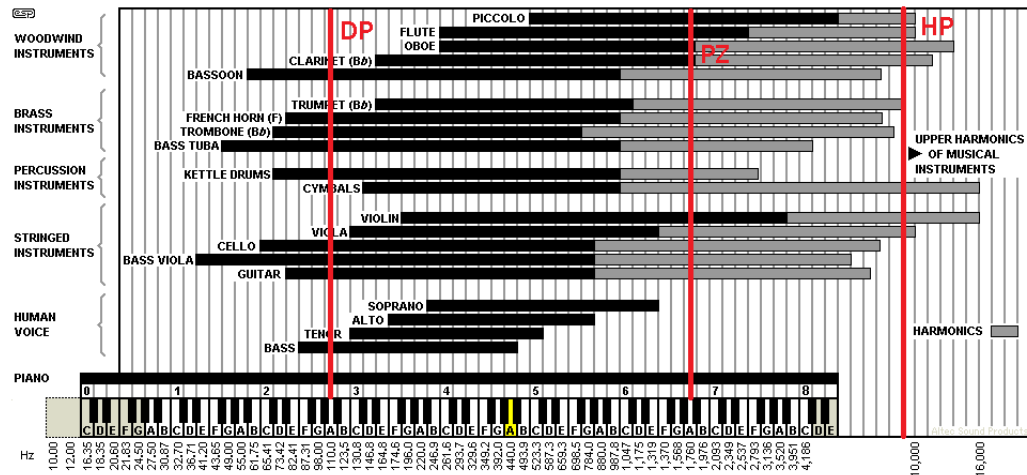
Praktická část se zabývá návrhem frekvenčních filtrů, volbou jejich parametrů, jako jsou mezní a rezonanční frekvence, jakost a řád filtrů, a dále volbou použitých součástek. Následuje konkrétní návrh s výpočtem hodnot součástek pro jednotlivé filtry (horní propust, dolní propust, pásmová propust). K ověření vypočítaných hodnot součástek jsou zde uvedeny simulace jednotlivých filtrů v programu LTspice. Práce pokračuje popisem kompletního zařízení a návrhem plošného spoje. Dále jsou uvedeny hodnoty získané měřením na zařízení doplněné o seznam použitých součástek.

2.1 Volba parametrů filtrů

2.1.1 Volba mezních frekvencí

Člověk je schopen vnímat zvuk o frekvenci přibližně 16 Hz až 20 kHz. Toto číslo je individuální a s věkem se slyšitelný rozsah frekvencí snižuje. Frekvenční rozsah hudby je shodný s frekvenčním rozsahem vnímání člověka. Frekvenční rozsah jednotlivých hudebních nástrojů je vidět na obrázku 2.1. Elektronická hudba vykazuje vyšší podíl energie v oblasti vysokých a nízkých frekvencí [6]. Pro moji aplikaci jsem zvolil frekvence podle doporučení. Mezní frekvenci DP (basy) 100 Hz, rezonanční frekvenci PP (střední) 1,75 kHz a mezní frekvenci HP (výšky) 9 kHz. V praxi to bude znamenat, že výsledný světelný efekt DP bude blikat do rytmu při úderech hlubokých tonů bubnů, efekt PP bude blikat velmi často, protože hudba obsahuje spousty středních

frekvencí, oproti efektu HP, který se rozsvítí jen občas, protože vysokých tónů v taneční hudbě, pro kterou se tento efekt převážně využívá, příliš mnoho není.



Obrázek 2.1: Frekvenční rozsah hudebních nástrojů s vyznačenými frekvencemi filtrů

2.1.2 Volba činitele jakosti

Činitel jakosti volíme co nejbližší hodnoty 0,707, což odpovídá poklesu napětí o 3 dB, pro který je navrhována mezní frekvence. Tento činitel jakosti také volíme pro maximální míru přenosu.

2.1.3 Volba řádu filtru

Řád filtru volíme 1 z důvodu jednoduchosti a nižší ceny než u filtrů vyšších řádů. Strmost přenosové funkce filtru prvního řádu bude pro naši aplikaci dostačující.

2.2 Volba součástek

2.2.1 Volba rezistorů

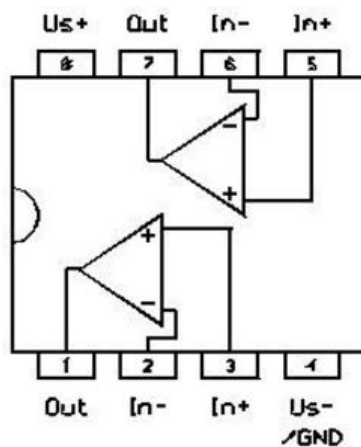
Rezistory jsou dostatečně stabilní součástky, které se vyrábí v dostatečně přesných řadách. V případě potřeby použít hodnoty odporu mimo výrobní řady je možné pomocí sériového nebo paralelního spojení rezistorů realizovat libovolnou hodnotu odporu. Pro tuto aplikaci byly použity metalizované rezistory z výrobní řady E24 s přesností 1% [3].

2.2.2 Volba kondenzátorů

Požadavky na použité kondenzátory jsou dostatečná stabilita a kapacita. Dalšími kritérii jsou velikost a cena. Vhodné jsou kondenzátory s umělohmotnými dielektriky (keramické nebo polystyrenové), z důvodů menší hodnoty kapacity. Kondenzátory s papírovým dielektrikem jsou méně vhodné. Nevhodné jsou keramické kondenzátory s vysokou permitivitou. Kondenzátory s elektrolytem jsou naprosto nevhodné. Pro tuto aplikaci byly použity malé keramické kondenzátory z výrobní řady E12 a s přesností 10% [3].

2.2.3 Volba aktivních prvků

Pro kompenzaci ztrát RC obvodů se používají jako aktivní prvky různá zapojení zesilovačů spolu s napájecím zdrojem. Zesilovače mohou být realizovány jako diskrétní, ale jejich použití nahradily v dnešní době integrované obvody. Integrované obvody jsou realizované jako jedno či více stupňové tranzistorové zesilovače, operační zesilovače s napěťovou nebo proudovou zpětnou vazbou, transkonduktanční zesilovače nebo proudové konvejory [1]. Jelikož se budeme pohybovat v oblasti pracovní frekvence do 1 MHz, bude nejvýhodnější zvolit klasické operační zesilovače s napěťovou zpětnou vazbou. Výhodou těchto zesilovačů je nízká cena a dobrá dostupnost. Jejich nevýhodou je výskyt parazitních vlivů OZ. Pro tuto aplikaci byly zvoleny OZ TLC272CP [12], které nepotřebují symetrické napájení s kladnou a zápornou hodnotou napětí, ale jsou navrženy na napájecí napětí 12 V. Vnitřní uspořádání těchto IO obsahuje dva operační zesilovače (viz obr. 2.2).

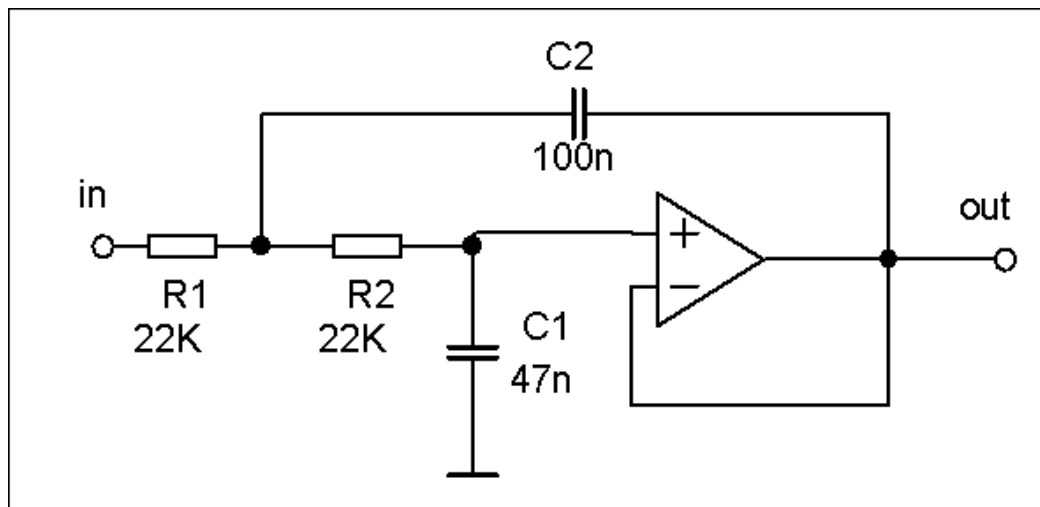


Obrázek 2.2: Vnitřní uspořádání IO TLC272CP

2.3 Návrhy filtrů

2.3.1 Návrh dolní propusti

Dolní propust je realizována zapojením DP Sallen-Key a navržena na mezní kmitočty 100 Hz, pro filtraci hlubokých tónů (basů), s jednotkovým zesílením $K=1$. Činitel jakosti Q by měl být co nejbližší hodnotě 0,707. Zaokrouhloeno na výrobní řady součástek. Odpory R_1 a R_2 volíme stejné. Pro hrubý návrh DP, bez zaokrouhlení součástek na výrobní řady, byla použita online kalkulačka [8]. Dále byly navržené hodnoty simulovány v programu LTspice. Uvedené rovnice jsou již pro konkrétní součástky.



Obrázek 2.3: Schéma DP Sallen-Key

Vztah pro výpočet mezního kmitočtu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} = 100 \text{ Hz}, \quad (2.1)$$

zvolené součástky: $R_1=R_2=22 \text{ k}\Omega$, $C_1=47 \text{ nF}$, $C_2=100 \text{ nF}$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{47 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^3}} = 105,5 \text{ Hz}, \quad (2.2)$$

činitel jakosti:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} = 0,707, \quad (2.3)$$

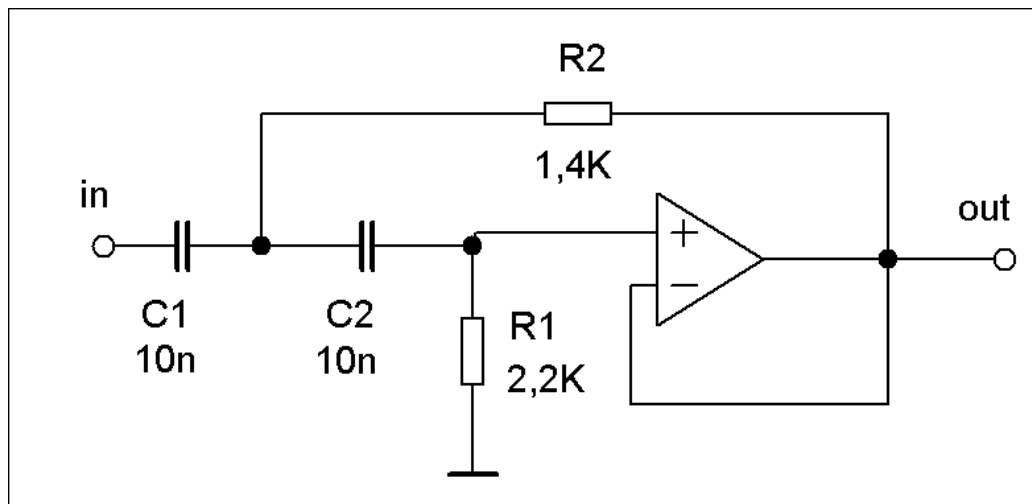
činitel jakosti po dosažení:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{100}{47}} = 0,729. \quad (2.4)$$

2.3.2 Návrh horní propusti

Horní propust je realizována zapojením HP Sallen-Key a navržena na mezní kmitočet 9 kHz, pro filtraci vysokých tónů, s jednotkovým zesílením $K=1$.

Činitel jakosti Q by měl být co nejbližší hodnotě 0,707. Zaokrouhлено na výrobní řady součástek. Kondenzátory $C1$ a $C2$ volíme stejné. Pro hrubý návrh HP, bez zaokrouhlení součástek na výrobní řady, byla použita online kalkulačka [9]. Dále byly navržené hodnoty simulovány v programu LTspice. Uvedené rovnice jsou již pro konkrétní součástky.



Obrázek 2.4: Schéma HP Sallen-Key

Vztah pro výpočet mezního kmitočtu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} = 9 \text{ kHz}, \quad (2.5)$$

zvolené součástky: $C1=C2=10 \text{ nF}$, $R1=2,2 \text{ k}\Omega$, $R2=1,4 \text{ k}\Omega$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 2,2 \cdot 10^3 \cdot 1,4 \cdot 10^3}} = 9068,7 \text{ Hz}, \quad (2.6)$$

činitel jakosti:

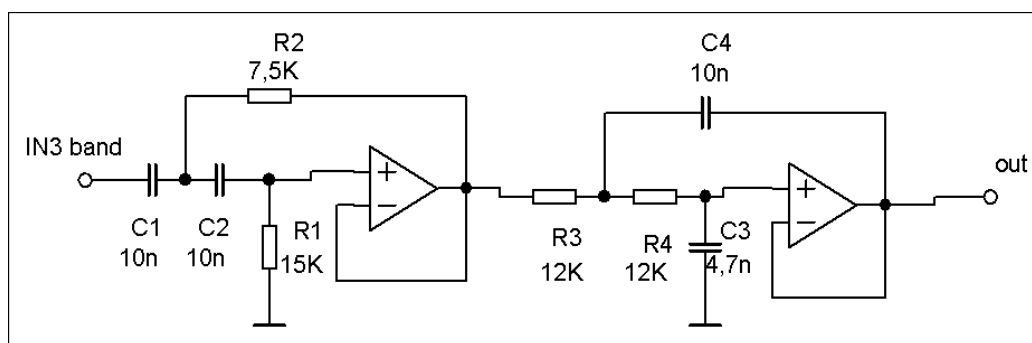
$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = 0,707, \quad (2.7)$$

činitel jakosti po dosažení:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2,2}{1,4}} = 0,627. \quad (2.8)$$

2.3.3 Návrh pásmové propusti

Pásmová propust je realizována kaskádním zapojením HP a DP Sallen-Key navržená na rezonanční frekvenci 1,75 kHz s šířkou pásma 0,5 kHz, pro filtraci středních tónů, s jednotkovým zesílením $K=1$. Činitel jakosti Q by měl být co nejbližší hodnotě 0,707. Zaokrouhloeno na výrobní řady součástek. Kondenzátory C_1, C_2, C_4 a rezistory R_3, R_4 volíme stejné. Pro hrubý návrh HP a DP, bez zaokrouhlení součástek na výrobní řady, byla použita online kalkulačka [8], [9]. Dále byly navržené hodnoty simulovány v programu LTspice. Uvedené rovnice jsou již pro konkrétní součástky.



Obrázek 2.5: Schéma PZ Sallen-Key

Vztah pro výpočet mezního kmitočtu DP:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} = 2 \text{ kHz}, \quad (2.9)$$

vztah pro výpočet mezního kmitočtu HP:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_3 C_4 R_3 R_4}} = 1,5 \text{ kHz}, \quad (2.10)$$

zvolené součástky: $C_1=C_2=C_4=10 \text{ nF}$, $R_1=15 \text{ k}\Omega$, $R_2=7,5 \text{ k}\Omega$, $R_3=R_4=12 \text{ k}\Omega$

$$f_0^{DP} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 7,5 \cdot 10^3}} = 1500,5 \text{ Hz}, \quad (2.11)$$

$$f_0HP = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \cdot 10^{-9} \cdot 4,7 \cdot 10^{-9} \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot 12 \cdot 10^3}} = 1934,6 \text{ Hz}, \quad (2.12)$$

výpočet rezonanční frekvence PP:

$$f_rPP = \frac{f_0HP + f_0DP}{2} = 1717,6 \text{ Hz}, \quad (2.13)$$

výpočet šířky pásma PP:

$$B_{PP} = f_0HP - f_0DP = 434,1 \text{ Hz}, \quad (2.14)$$

činitel jakosti DP:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = 0,707, \quad (2.15)$$

činitel jakosti DP po dosazení:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{15}{7,5}} = 0,707, \quad (2.16)$$

činitel jakosti HP:

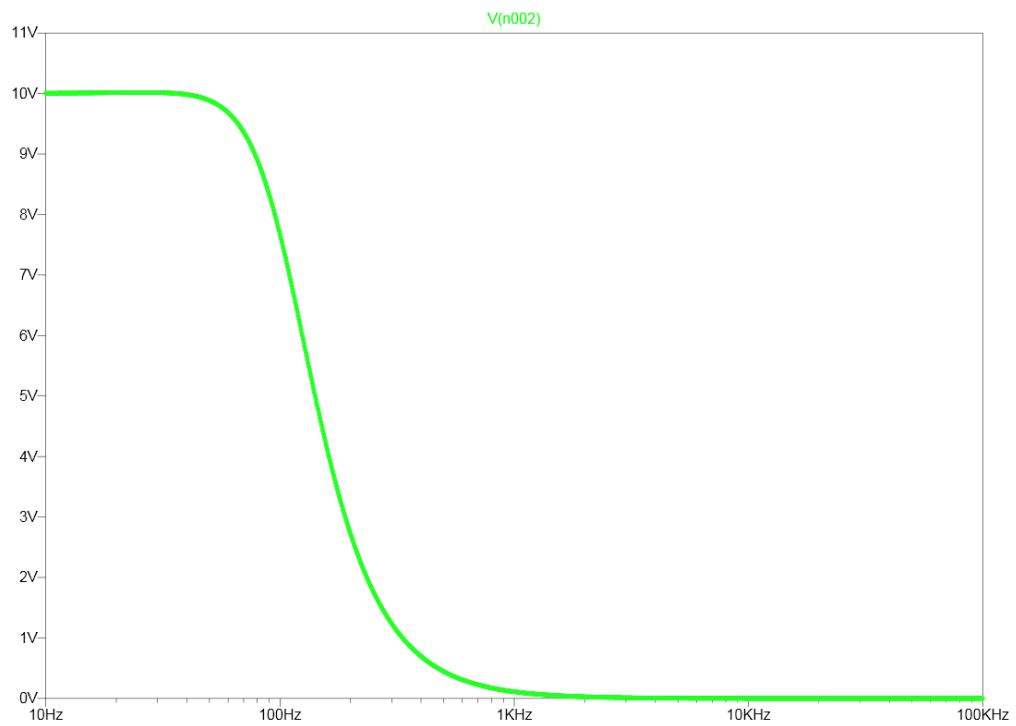
$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_4}{C_3}} = 0,707, \quad (2.17)$$

činitel jakosti HP po dosazení:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{10}{4,7}} = 0,729. \quad (2.18)$$

2.4 Simulace filtrů

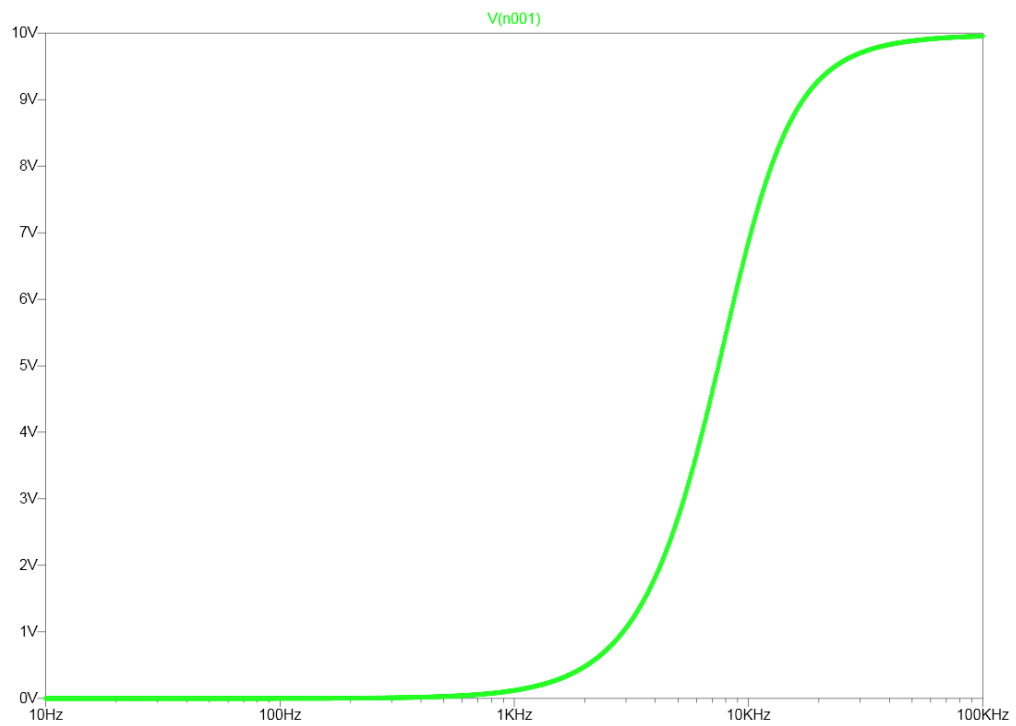
Pro ověření funkčnosti zapojení byly všechny tři druhy filtrů nejdříve simulovány. K simulaci byl použit program LTspice.



Obrázek 2.6: Simulace DP Sallen-Key $f_0=105,5$ Hz

Dolní propust

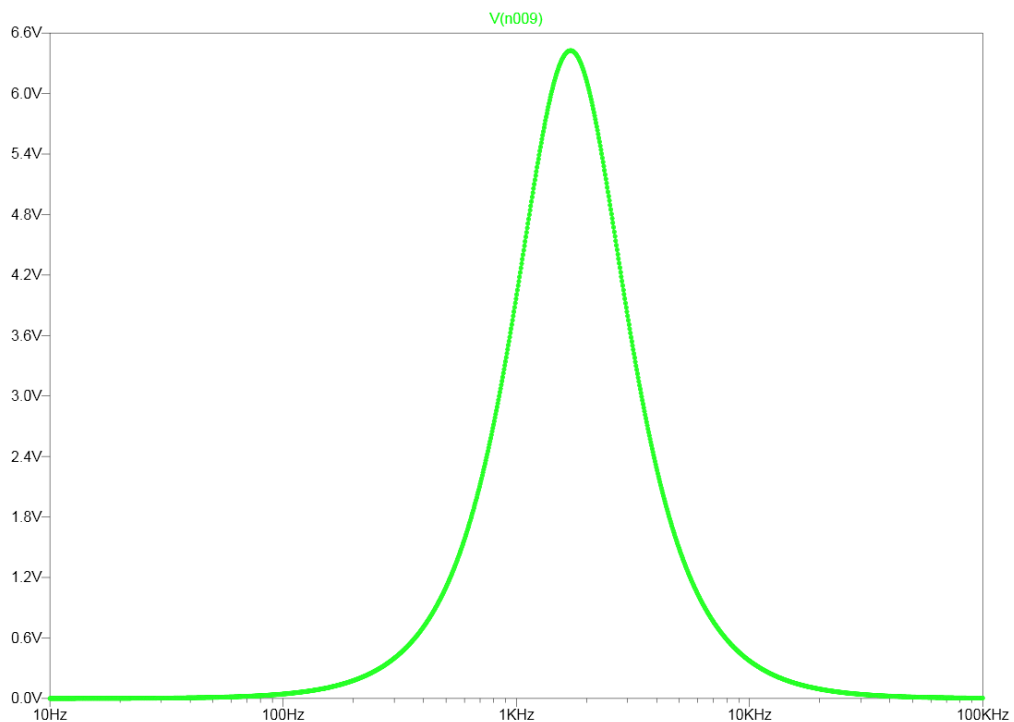
Simulace dolní propusti prvního řádu pro hluboké tóny (basy), zapojení Sallen-Key obrázek 2.6, pro mezní kmitočet 105,5 Hz (rovnice 2.2), odpovídá požadavkům.



Obrázek 2.7: Simulace HP Sallen-Key $f_0=9068,7$ Hz

Horní propust

Simulace horní propusti prvního řádu pro vysoké tóny, zapojení Sallen-Key obrázek 2.7, pro mezní frekvenci 9068,7 Hz (rovnice 2.6), odpovídá požadavkům.



Obrázek 2.8: Simulace PP Sallen-Key $f_r=1717,6$ Hz

Pásmová propust

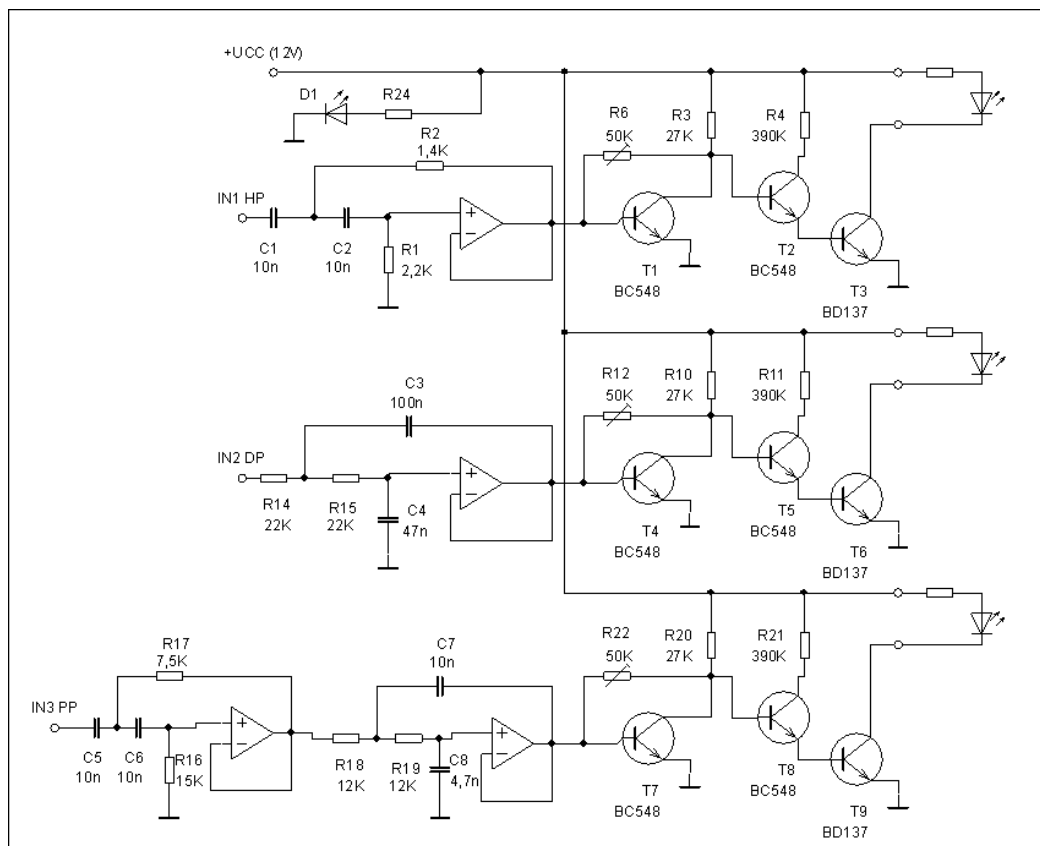
Simulace pásmové propusti prvního řádu pro střední tóny, kaskádní zapojení HP a DP Sallen-Key obrázek 2.7, pro rezonanční frekvenci 1717,6 Hz (rovnice 2.13) a šířku pásma (rovnice 2.14), odpovídá požadavkům.

2.5 Popis zařízení

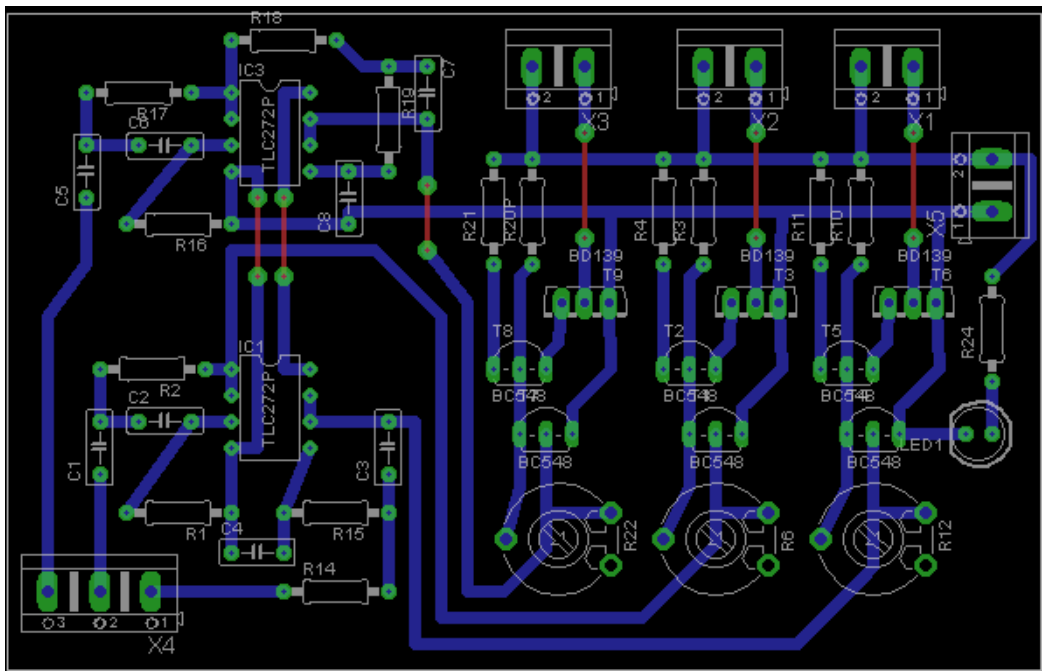
Mnou navržené zařízení reaguje na tři různé frekvenční oblasti zvukového signálu: výšky (9068,7 Hz), středy (od 1500,5 Hz do 1934,6), basy (105,5 Hz). Spínací obvod je převzat z [13]. Analogový zvukový signál je přiváděn pomocí 3,5 jack konektoru. Možná by byla i realizace pomocí mikrofону, ale při použití mikrofону se do signálu vnáší rušivé zvuky z okolí. Maximální spínaný proud je $I_c = 1,5$ A. Zařízení je napájeno z adaptéru 12 V DC.

2.6 Návrh plošného spoje

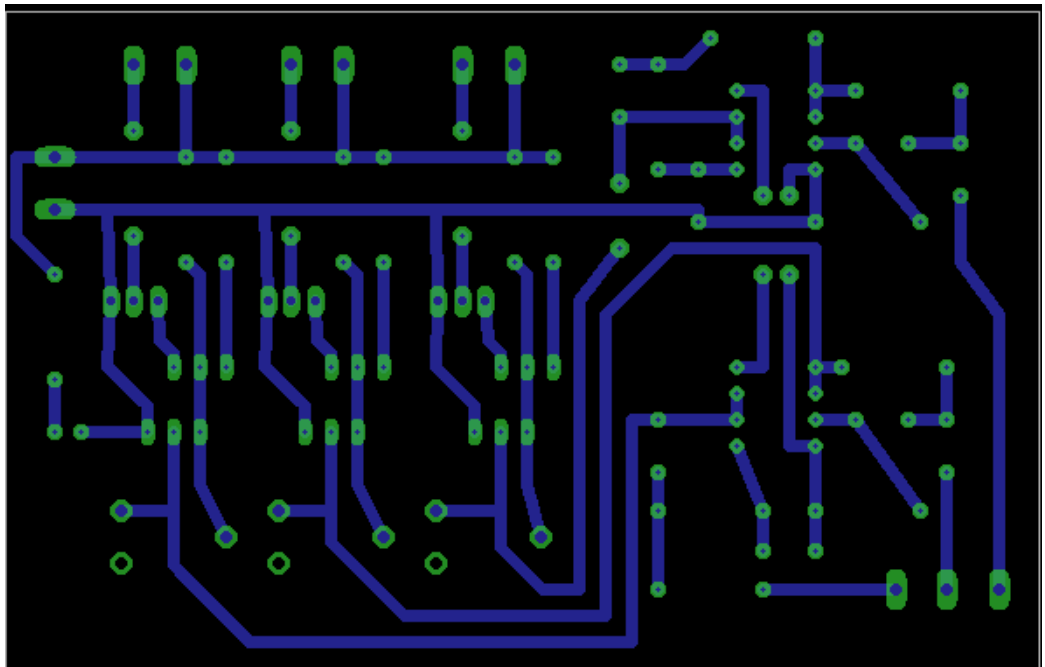
K návrhu plošného spoje byl použit program Eagle. Návrh spočíval ve vytvoření schématu s nastavenými pouzdry součástek a následného uspořádání již konkrétních součástek na plochu plošného spoje. Tato část byla nejtěžší, protože navrhnout rozmístění tak, aby se spoje nekřížily, nebylo jednoduché. Navrhnout rozmístění bez překřížení spojů nebylo možné, proto bude zapotřebí některé spoje přemostit propojkou. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 2.9.



Obrázek 2.9: Schéma kompletního zařízení



Obrázek 2.10: Návrh plošného spoje s osazením součástek



Obrázek 2.11: Spodní strana plošného spoje

2.7 Měření

Funkčnost zapojení byla ověřena měřením na reálném zvukovém signálu. Pomocí programu Audacity byl generován signál měnící se v čase od 16 Hz do 16 kHz a obráceně od 16 kHz do 16 Hz. Dle aktuálně hrající frekvence byl sledován jas LED diod. Sledováno bylo při jaké frekvenci se diody začnou rozsvěcovat a kdy dosáhnou maximálního jasu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce 2.1. Naměřené hodnoty ukazují, že se diody začínají rozsvěcet od nižších popřípadě vyšších frekvencí než jsou vypočtené mezní a kritické frekvence. Nejvýrazněji se tento jev projeví u vyšších frekvencí PP. Tento jev vyplývá z parametrů navržených filtrů a je zřejmý i z obrázků 2.6, 2.8 a 2.7. Strmost náběhu by šlo vylepšit použitím filtrů vyšších řádů, ale pro moji aplikaci je toto použití dostatečné.

Tabulka 2.1: Naměřené hodnoty

Filtr	f rozsvícení [Hz]	f max. jas [Hz]
měřeno od 16 Hz do 16 kHz		
PP $f_r=1717,6$ HZ	1000	1300
HP $f_0=9068,7$ HZ	5500	8000
měřeno od 16 kHz do 16 hz		
PP $f_r=1717,6$ HZ	4100	2600
DP $f_0=105,5$ HZ	250	140

2.8 Použité součástky

Tabulka 2.2: Použité součástky

Označení	Hodnota	popis
R1	2,2 k Ω	Metalizovaný rezistor
R2	1,4 k Ω	Metalizovaný rezistor
R3	27 k Ω	Metalizovaný rezistor
R4	390 k Ω	Metalizovaný rezistor
R6	50 k Ω	Uhlíkový lineární trimr
R10	27 k Ω	Metalizovaný rezistor
R11	390 k Ω	Metalizovaný rezistor
R12	50 k Ω	Uhlíkový lineární trimr
R14	22 k Ω	Metalizovaný rezistor
R15	22 k Ω	Metalizovaný rezistor
R16	15 k Ω	Metalizovaný rezistor
R17	7,5 k Ω	Metalizovaný rezistor
R18	12 k Ω	Metalizovaný rezistor
R19	12 k Ω	Metalizovaný rezistor
R20	27 k Ω	Metalizovaný rezistor
R21	390 k Ω	Metalizovaný rezistor
R22	50 k Ω	Uhlíkový lineární trimr
R24	470 Ω	Metalizovaný rezistor
C1	10 nF	Keramický kondenzátor
C2	10 nF	Keramický kondenzátor
C3	100 nF	Keramický kondenzátor
C4	47 nF	Keramický kondenzátor
C5,	10 nF	Keramický kondenzátor
C6	10 nF	Keramický kondenzátor
C7	10 nF	Keramický kondenzátor
C8	4,7 nF	Keramický kondenzátor

T1	BC 548	Bipolární tranzistor
T2	BC 548	Bipolární tranzistor
T3	BD 237	Bipolární tranzistor
T4	BC 548	Bipolární tranzistor
T5	BC 548	Bipolární tranzistor
T6	BD 237	Bipolární tranzistor
T7	BC 548	Bipolární tranzistor
T8	BC 548	Bipolární tranzistor
T9	BD 237	Bipolární tranzistor
IC1	TLC272CP	Operační zesilovač
IC3	TLC272CP	Operační zesilovač
D1	LED 5mm yellow	Žlutá LED dioda
X1	ARK550/2EX	Svorkovnice do DPS
X2	ARK550/2EX	Svorkovnice do DPS
X3	ARK550/2EX	Svorkovnice do DPS
X4	ARK550/3EX	Svorkovnice do DPS
X5	ARK550/2EX	Svorkovnice do DPS

3

Závěr

V této práci byly popsány principy různých světelných efektů a dále byla práce zaměřena na světelný efekt zvaný barevná hudba. V teoretické části byly popsány možnosti realizace. Vybrán byl analogový způsob řešení na bázi Sallen-Key filtrů. Obecné vlastnosti filtrů spolu s principem zmiňovaného filtru Sallen-Key byly popsány v následující části. Praktická část se zabývala návrhem filtrů od volby parametrů filtrů po volbu použitých součástek. Na základě vstupních parametrů (fyziologie sluchu) byly filtry navrženy, simulovány a bylo realizováno zapojení včetně LED diod a tranzistorů. Funkčnost byla ověřena reálným měřením.

Jednou z možností rozvoje této práce je rozšíření o více pásem, pro které by bylo vhodné použití frekvenčních filtrů vyšších řádů s vyšší strmostí náběhu. Jako další možnost rozšíření by bylo použití výkonových prvků napájených ze sítě 230 V. Jako zobrazovací prvek by sloužily žárovky a jako spínací prvky by byly použity tyristory. Pro tuto aplikaci by bylo potřeba zesílení vstupního audio signálu vstupním transformátorem nebo zesilovačem.

Literatura

- [1] B. Brtník, Analogové soustavy, Praha 2013, ISBN 978-80-7300-490-3
- [2] J. Grygar, Bakalářská práce Hudební světelný efekt, Vysoké učení technické v Brně 2014
- [3] K. Hájek, J. Sedláček, Kmitočtové Filtry, Praha 2002, ISBN 80-7300-023-7
- [4] R. Linhart, Příruční slovníček Základů sdělovací techniky 2004, [online]. [cit. 19-05-2015]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~rlinhart/>
- [5] Praktická elektronika A Radio. Praha: AMARO spol. s r. o., 1996, I, č. 3. [online]. [cit. 10-05-2015]. Dostupné z: <http://www.aradio.cz/>
- [6] J. Stifter, 3. přednáška ZST Lidská řeč, zvukový/hudební signál, útlumové zkreslení, elektroakustické měniče, telekomunikační vidlice, analogový telefonní přístroj, Plzeň 2014
- [7] Laboratorní cvičení TEO, 9 dolní propust Sallen Key, Brno 2010 [online]. [cit. 21-05-2015]. Dostupné z <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/mteo/09%20dolni%20propust%20Sallen%20Key%20-%20teoreticky%20uvod.pdf>
- [8] Sallen Key Lowpass Filter Designer [online]. [cit. 21-05-2015]. Dostupné z: http://www.changpuak.ch/electronics/calc_08.php
- [9] Sallen Key Highpass Filter Designer [online]. [cit. 21-05-2015]. Dostupné z: http://www.changpuak.ch/electronics/calc_09.php

- [10] Datasheet UAA180 [online]. [cit. 21-05-2015]. Dostupné z: <http://www.datasheet-pdf.com/datasheet/Siemens/499991/UAA180.pdf.html>
- [11] Datasheet A277D [online]. [cit. 21-05-2015]. Dostupné z: <http://www.datasheet-pdf.com/datasheet/ETC/638496/A277D.pdf.htm>
- [12] Datasheet TLC272CP [online]. [cit. 21-05-2015]. Dostupné z: <http://www.datasheet-pdf.com/datasheet/TexasInstruments/317241/TLC272CP.pdf.html>
- [13] Spínací obvod [online]. [cit. 24-05-2015]. Dostupné z: <http://theradix.blogspot.sk/2011/07/farebna-hudba.html>