

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2018

Vilém Friml



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VSTUPNÍ AUDIO ZESILOVAČ PRO LABORATORNÍ VÝUKU

AUDIO PRE-AMPLIFIER FOR LABORATORY MEASUREMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vilém Friml

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Vilém Friml

ID: 186061

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Vstupní audio zesilovač pro laboratorní výuku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete blokovou a obvodovou strukturu vstupního audio předzesilovače, který by integroval vstupní útlumové články pro nastavení citlivosti, přepínatelný předzesilovač v provedení s diskretními prvky a operačními zesilovači, volitelné frekvenční korekce vstupů (např. RIAA, zdůraznění řeči, pevný ekvalizér) a výstupní linkový zesilovač. Při návrhu zohledněte zejména požadavky kladené na laboratorní přípravky pro předmět Nízkofrekvenční a audio elektronika.

V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, atd.). Navržený vstupní zesilovač realizujte formou funkčního laboratorního přípravku a experimentálním měřením v laboratoři ověřte jeho činnost. Vypracujte zadání laboratorní úlohy a výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu o měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN – technická literatura, 2003.
- [2] KOTISA, Z. NF zesilovače – 1. díl Předzesilovače. BEN – technická literatura, Praha, 2001.
- [3] METZLER, B. Audio Measurement Handbook. Beaverton, Audio Presision, Inc., 1993.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Práce řeší návrh audio předzesilovače s pevnými přepínatelnými korekcemi a volbou mezi zesílením pomocí integrovaných obvodů a diskrétních prvků. Součástí návrhu je vstupní atenuátor, zesilovač s operačním zesilovačem, zesilovač s diskrétními prvky, korekce RIAA, korekce zdůraznění řeči, fyziologická korekce, korekce Rock preset a obvody napájení. V práci je také popsán návrh plošného spoje, řešení oscilací zesilovače s diskrétními prvky a měření vlastností zařízení. Cílem práce je navrhnout a sestavit zařízení do laboratorní výuky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nízkofrekvenční předzesilovač, frekvenční korekce, operační zesilovač, tranzistor, atenuátor, impedanční přizpůsobení, napájení, plošný spoj, oscilace, měření

ABSTRACT

This thesis deals with a design of audio pre-amplifier with fixed frequency filters and a choice between amplification using integrated circuits and solidstate circuit. The thesis includes a design of attenuation circuit, an amplifier with an integrated circuit, an amplifier with transistors, a RIAA filter, a speech filter, a physiological filter, a rock preset filter and a power supply circuit. The thesis describes design of the circuit board, solution of oscillations of the amplifier with transistors and a measurement of the constructed device. The aim of the thesis is the design and construction of laboratory equipment.

KEYWORDS

Audio pre-amplifier, frequency filter, operational amplifier, transistor, attenuator, impedance matching, power supply, circuit board, oscillations, measurement

FRIML, Vilém. *Vstupní audio zesilovač pro laboratorní výuku*. Brno, 2017, 61 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Vstupní audio zesilovač pro laboratorní výuku“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Tomášovi Kratochvílovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	11
1 Rozbor zadání	12
1.1 Postup návrhu	12
1.2 Požadavky	12
2 Teoretický úvod	14
2.1 Atenuátor	14
2.1.1 Konfigurace L	14
2.1.2 Konfigurace T	14
2.1.3 Konfigurace Π	14
2.2 Operační zesilovač	15
2.2.1 Druhy zapojení	15
2.2.2 Součtový zesilovač	16
2.3 Tranzistorový zesilovač	16
2.3.1 Zapojení se společným emitorem	17
2.3.2 Vstupní a výstupní impedance	18
2.3.3 postup návrhu	18
2.4 Kmitočtové filtry	19
2.4.1 Dolní propust, horní propust	19
2.4.2 RIAA Korekce	19
3 Návrh zařízení	20
3.1 Blokové schéma	20
3.2 Atenuátor	20
3.3 Zesilovač s operačním zesilovačem	23
3.4 Zesilovač s diskrétními prvky	25
3.5 Výstupní zesilovač	28
3.6 Frekvenční korekce	29
3.6.1 RIAA	29
3.6.2 Rock preset	29
3.6.3 Zdůraznění řeči	31
3.6.4 Fyziologická korekce	32
3.7 Napájení	33
4 Praktická část	35
4.1 Návrh plošného spoje	35
4.2 Sestrojování zařízení	36
4.3 Šum zesilovače s diskrétními prvky	37
4.4 Odstraňování oscilací	37

4.5 Měření vlastností přípravku	43
5 Závěr	45
Literatura	47
Seznam příloh	49
A Simulace	50
B Obvodová struktura	51
C Plošný spoj	54
D Soupiska součástek	56
D.1 Pasivní součástky	56
D.1.1 Rezistory	56
D.1.2 Kondenzátory	57
D.2 Polovodičové součástky	58
D.3 Ostatní součástky	59
E Měření	60
F Obsah přiloženého CD	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Základní konfigurace útlumových článků	15
2.2	Základní zapojení operačních zesilovačů	16
2.3	Zapojení součtového zesilovače	16
2.4	Základní zapojení se společným emitorem	17
3.1	Blokové schéma navrhovaného zařízení	21
3.2	Zapojení atenuátoru	22
3.3	Návrh zpětné vazby zesilovače s operačním zesilovačem	24
3.4	Celkový návrh zesilovače s operačním zesilovačem	25
3.5	Navržené stupně zesilovače s diskrétními prvky	27
3.6	Celkový návrh zesilovače s diskrétními prvky	28
3.7	Celkový návrh výstupního zesilovače	28
3.8	Linely-Hoodovo zapojení korekčního dvojpólu RIAA	29
3.9	Celkové zapojení korekčního bloku RIAA	30
3.10	Celkové zapojení Rock presetu	31
3.11	Celkové zapojení korekce zdůraznění řeči	32
3.12	Fyziologický regulátor hlasitosti s pevným útlumem	32
3.13	Celkové zapojení fyziologické korekce hlasitosti	33
3.14	Schéma obvodu napájení	34
4.1	Osazovací pláněk	36
4.2	Zapojení rezistoru chránícího před zkratováním výstupu zařízení	37
4.3	Ukázka oscilací napěťového sledovače při nastavené citlivosti 10 mV	38
4.4	Zapojení oddělující impedanční zátěž od výstupu napěťového sledovače	39
4.5	Zapojení zesilovače s diskrétními prvky se zvýšenou vstupní impedancí zapojením typu boot-strap	40
4.6	Zapojení vstupního filtru proti rušení indukovanému na přívodech zařízení	41
4.7	Ukázka vlivu odstranění operačního zesilovače na oscilace zesilovače s DP	42
4.8	Ukázka vlivu odstranění operačního zesilovače na oscilace zesilovače s DP	43
4.9	Zkreslení zesilovače s diskrétními prvky	44
A.1	Simulace modulové kmitočtové charakteristiky zapojení zesilovače s operačním zesilovačem a zesilovače s diskrétními prvky	50
A.2	Simulace modulové kmitočtové charakteristiky všech navržených korekcí	50
B.1	Celkové schéma zapojení zesilovačů	51
B.2	Celkové schéma zapojení korekcí	52
B.3	Zapojení s odstraněnými oscilacemi	53
C.1	Navržený plošný spoj - pohled shora	54
C.2	Navržený plošný spoj - pohled zespodu	55
E.1	Změřená modulová frekvenční charakteristika zesilovačů	60
E.2	Změřená modulová frekvenční charakteristika frekvenčních korekcí	60

SEZNAM TABULEK

1.1	Tabulka vybraných proměnných	13
2.1	Časové konstanty a lomové frekvence charakteristiky RIAA	19
3.1	Hodnoty součástí atenuátoru	23
3.2	Parametry tranzistoru BC546B	25
3.3	Hodnoty rezistorů návrhu druhého stupně zesilovače s diskrétními prvky . .	26
3.4	Kmitočtová charakteristika Rock Presetu aplikace NRG player	30
D.1	Soupiska rezistorů	56
D.2	Soupiska kondenzátorů	57
D.3	Soupiska tranzistorů	58
D.4	Soupiska operačních zesilovačů	58
D.5	Soupiska diod	58
D.6	Soupiska spínačů	59
D.7	Soupiska konektorů	59
D.8	Soupiska ostatních součástek	59
F.1	Obsah příloženého CD	61

ÚVOD

Tato práce se věnuje problematice návrhu nízkofrekvenčních předzesilovačů. Nízkofrekvenční předzesilovače mají za úkol hlavně impedančně přizpůsobit zdroj signálu výkonovému zesilovači, či jinému zařízení zpracovávajícímu signál. Vstupní zesilovače mají také za úkol zesílit signál na úroveň, kterou je následující zařízení schopno bez zkreslení a zhoršení šumových poměrů přijímat. Součástí zesilovače také může být blok upravující frekvenční charakteristiku signálu. Tato práce se věnuje návrhu zesilovače určeného do laboratorní výuky. Součástí zapojení je atenuátor, přepínatelné zesílení pomocí operačního zesilovače a tranzistorového zesilovače a výstupní zesilovač. Práce také obsahuje návrh přepínatelných frekvenčních korekcí. Vzhledem k tomu, že má být přípravek požíván v laboratorní výuce, je kladen důraz na jednoduchost a stabilitu zapojení. Práce obsahuje rozbor zadání, kde jsou podrobně probírány nároky na navrhovaný zesilovač a následuje teoretický úvod, který se věnuje problematice návrhu elektronických zařízení. Další kapitolou je samotný návrh obvodové struktury zesilovače členěný podle jednotlivých navrhovaných bloků. V následující kapitole je rozebrán postu při návrhu plošného spoje, jeho realizaci, návrh krabice přístroje a postup měření sestaveného zařízení. Práce také obsahuje simulaci zapojení realizovanou pomocí softwaru Protheus design suite a výsledky měření. Součástí práce je také zadání laboratorní úlohy, která má být na sestaveném zařízení měřena.

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Cílem semestrální práce je seznámit se se základními druhy zapojení s tranzistory a operačními zesilovači používanými v nízkofrekvenční elektrotechnice. Za pomoci těchto znalostí dále navrhnout laboratorní přípravek splňující nároky uvedené v zadání tak, aby byly zjevné výhody a nevýhody zapojení s diskretními prvky a operačními zesilovači. Navržený přípravek odsimulovat například pomocí programu PSpice či Protheus a posléze zkonstruovat jeho prototyp. U realizovaného zapojení ověřit měřením v laboratoři jeho funkčnost a zpracovat výsledky formou standardního protokolu o měření.

1.1 Postup návrhu

Navržený zesilovač má v sobě integrovat více druhů zapojení mezi kterými musí být možnost přepínání. Proto je výhodnější navrhovat zařízení po jednotlivých blocích. To nám umožní přemýšlet nad jednotlivými funkčními články individuálně a soustředit se na nároky potřebné pro správnou funkci právě navrhovaného bloku. Při návrhu musíme však brát v potaz i kompatibilitu jednotlivých bloků.

1.2 Požadavky

Jeden z hlavních požadavků na realizovaný přípravek je jeho odolnost vůči mechanickému poškození. Přípravek se bude nacházet v laboratořích VUT, kde bude studenty používán jako měřicí přípravek v rámci laboratorních cvičení předmětu BNFE. Proto by měla být struktura zařízení odolná, jednoduchá a stabilní. Tomu se musí přizpůsobit i volba součástek, ze kterých bude přístroj zkonstruován. Mechanické součástky by měly být odolné, integrované obvody vyměnitelné. Pouzdro přípravku musí být pevně uzavřeno, v případě potřeby by však měla být možnost zařízení otevřít z důvodů servisní údržby. Způsob montáže na desku plošného spoje je zvolena klasická, vrтанá, jednovrstvá. Důvodem je vyhnout se povrchové montáži, která je sice méně náročná na prostor, je však méně mechanicky odolná a hůře odvádí teplo.

Zařízení není koncipováno jako hi-fi nízkošumový přístroj. Nejsou proto kladeny vysoké nároky na přenosové pásmo, šumové poměry, zkreslení atd. Vstupní signál bude dodáván laboratorním generátorem. Nejmenší možný signál, který je tento generátor schopen spolehlivě dodávat je 10 mV. Proto bude tato hodnota brána jako výchozí vstupní signál. Na vstupu zesilovače by měl být útlumový článek s útlumem až -60 dB. Kdybychom však tento útlumový článek zapnuly pro vstupní signál 10 mV, na vstupu zesilovače by bylo 10 μ V. Takto nízký vstupní signál by nebylo možné spolehlivě zesilovat. Proto budeme úroveň vstupního signálu zvedat při zapínání jednotlivých útlumových článků tak, aby na výstupu atenuátoru byla vždy výchozí hodnota 10 mV. To tedy znamená, že pokud bude v činnosti útlumový článek s útlumem -60 dB, na výstupu generátoru musí být 10 V.

Navrhované korekce budou čtyři. RIAA korekce, zdůraznění řeči, fyziologická korekce hlasitosti a jedno korekční nastavení inspirované žánrovým presetem pevného equalizeru

námi vybraného zařízení. Celkové zesílení se nesmí při zapnutí žádné z korekcí změnit. Z toho plyne, že všechny korekce musí být pevné aktivní korekce s nastavením zesílení na nominální frekvenci 1 kHz na 0 dB. Následuje tabulka vybraných proměnných, s možným rozmezím hodnot a vybranými hodnotami 1.1.

Tab. 1.1: Tabulka vybraných proměnných

Název proměnné	Proměnná	Rozmezí hodnot	Vybraná hodnota
Vstupní signál	U_{in}	10 mV - 10 V	10 mV - 10 V
Výstupní signál	U_{out}	-	1 V
Vstupní impedance	Z_{in}	10 k Ω - 100 k Ω	51 k Ω
Výstupní impedance	Z_{out}	<10 k Ω	50 Ω
Útlum	K	(-0... - 60) dB	(-0, dB, -20, -40, -60) dB
Napájení	U_{cc}	± 9 V - ± 36 V	± 12 V
Impedance generátoru	Z_g	-	50 Ω

2 TEORETICKÝ ÚVOD

V této kapitole jsou uvedeny základní znalosti potřebné k návrhu vstupního zesilovače s aktivními korekcemi.

2.1 Atenuátor

Atenuátor je pasivní blok sloužící k zeslabení signálu. Při jeho zapnutí však nesmí dojít ke změně vstupního odporu zesilovače, aby nedošlo k přetížení generátoru, či jiného zdroje signálu na vstupu zařízení. Používá se jako první blok na vstupu zesilovačů, u kterých se předpokládá, že by mohl být vstupní signál příliš vysoký a mohlo by dojít k jeho limitaci či znehodnocení při průchodu zařízením. K jeho realizaci se využívají útlumové členy tvořené napěťovými děliči v různých konfiguracích.

2.1.1 Konfigurace L

Nejjednodušším typem útlumových článků používaných v atenuátorech je konfigurace L znázorněná na obrázku 2.1a. Jedná se o jednoduchý napěťový dělič složený ze dvou rezistorů. Jeho výhodou je jeho jednoduchost. Jeho nevýhodou je rozdílná vstupní a výstupní impedance definovaná velikostí odporů rezistorů. Zatímco vstupní impedance je dána sériovou kombinací obou rezistorů, výstupní impedance je definována paralelní kombinací těchto rezistorů. Při velkém potřebném zeslabení to tedy znamená velké rozdíly těchto impedancí. U této konfigurace platí pro činitel útlumu K :

$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.1)$$

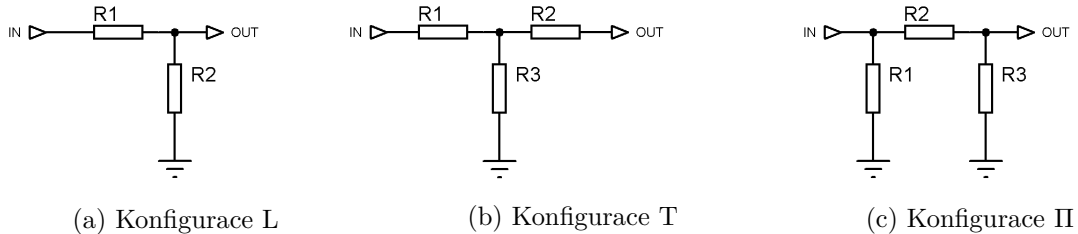
2.1.2 Konfigurace T

Druhým běžně užívaným útlumovým článkem je napěťový dělič v konfiguraci T znázorněný na obrázku 2.1b. Jedná se o útlumový člen L rozšířený o třetí odpor vložený mezi napěťový dělič a výstup. Při volbě $R_2 = R_3$ je možné dosáhnout stejné vstupní a výstupní impedance. Díky takto vzniklé symetrii je navíc možné článek provozovat v obousměrných zapojeních. Je však také možné přizpůsobit článek i různým impedancím předchozího a následujícího bloku. Toho lze dosáhnout zvolením různých hodnot pro rezistory R_1 a R_2 . Výpočty je možné najít v literatuře [1]. Útlum je tedy nastavován pomocí rezistoru R_3 . Hodnota odporu rezistoru R_3 při zvětšování útlumu klesá. To může mít za následek velké výkonové nároky na tento odpor.

2.1.3 Konfigurace II

Mezi útlumové členy používané v nízkofrekvenčních zapojeních patří i člen II znázorněný na obrázku 2.1c. Článek je opět možné vyvážit tak, že je symetrický a může tedy disponovat stejnými vstupními a výstupními impedancemi. Je-li však článek potřeba přizpůsobit

různým impedancím, je tak možné učinit volbou rozdílných hodnot pro rezistory R_1 a R_3 . Výpočty je opět možné dohledat v literatuře [1]. Zeslabení článku je tedy nastavováno převážně velikostí odporu rezistoru R_2 . Pro větší útlum velikost odporu R_2 stoupá. Zvětšující se velikost odporu R_2 může však značně ovlivňovat vstupní a výstupní impedanci bloku. Proto je nutné se zvětšujícím se odporem R_2 snižovat ostatní odpory. To může vést k vysokým výkonovým nárokům na odpory R_1 a R_3 .



Obr. 2.1: Základní konfigurace útlumových článků

2.2 Operační zesilovač

Operační zesilovač je integrovaný obvod sloužící k zesilování signálů. pro většinu účelů se používá se zapojenou zpětnou vazbou, která převážně určuje jeho chování a vlastnosti. Operační zesilovač však může mít i jiné využití, například jako komparátor.

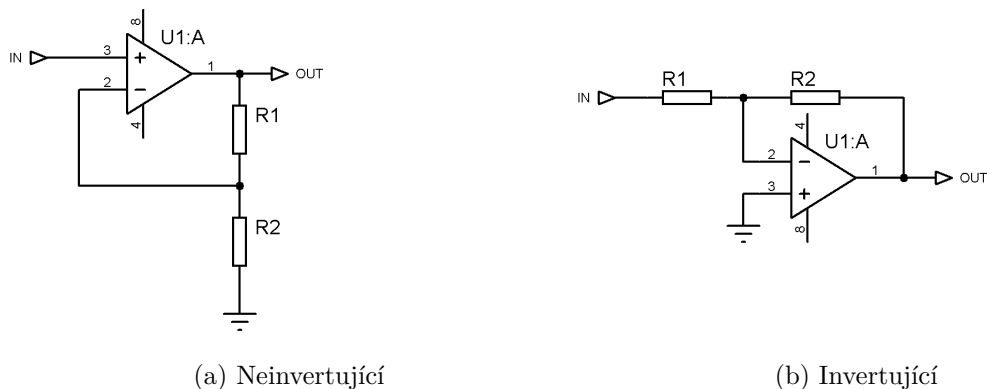
Bylo rozhodnuto, že vzhledem k požadavkům na navrhovaný přístroj není třeba používat drahé, vysoce kvalitní operační zesilovače. Naopak, při použití běžných levných audio operačních zesilovačů vyniknou všechny jejich vlastnosti. Pro účely návrhu byl zvolen operační zesilovač TL072.

2.2.1 Druhy zapojení

Existují dva základní druhy zapojení operačních zesilovačů. Neinvertující zapojení 2.2a má pro použití v audiotechnice více výhod, než zapojení neinvertující 2.2b. Má vstupní impedanci v řádech $M\Omega$, což znamená, že nepředstavuje téměř žádnou zátěž. Zapojení invertující má vstupní impedanci určenou odporem R_1 a funguje jako proudový zesilovač. Z rovnic pro zesílení invertujícího 2.3 a neinvertujícího 2.2 zapojení operačního zesilovače z literatury [2] vyplývá, že na rozdíl od neinvertujícího zapojení může mít invertující zapojení zesílení menší než $+0\text{ dB}$. Proto se používá v aktivních filtrech, kde je takového zesílení v určitých částech frekvenční charakteristiky vyžadováno. Zapojení jsou znázorněna na obrázku 2.2.

$$A_u = 1 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (2.2)$$

$$A_u = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.3)$$



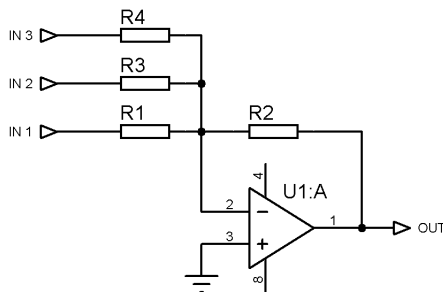
(a) Neinvertující

(b) Invertující

Obr. 2.2: Základní zapojení operačních zesilovačů

2.2.2 Součtový zesilovač

Zvláštním druhem neinvertujícího zapojení je sčítací zapojení neboli sumátor. Pokud je potřeba sčítat více signálů, není možné sčítat jejich napětí. Využívá se tedy invertujícího zapojení, které slouží jako proudový zesilovač. Přes odpory je napětí převedeno na proud, který se na vstupu zesilovače sečte. Změnou velikostí vstupních odporů se dá nastavit zesílení jednotlivých větví, takže je možné signály sčítat v různých poměrech. Podle literatury [3] platí pro výpočet princip superpozice, pro každou vstupní větev platí vztah 2.3. Zapojení součtového zesilovače je znázorněno na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Zapojení součtového zesilovače

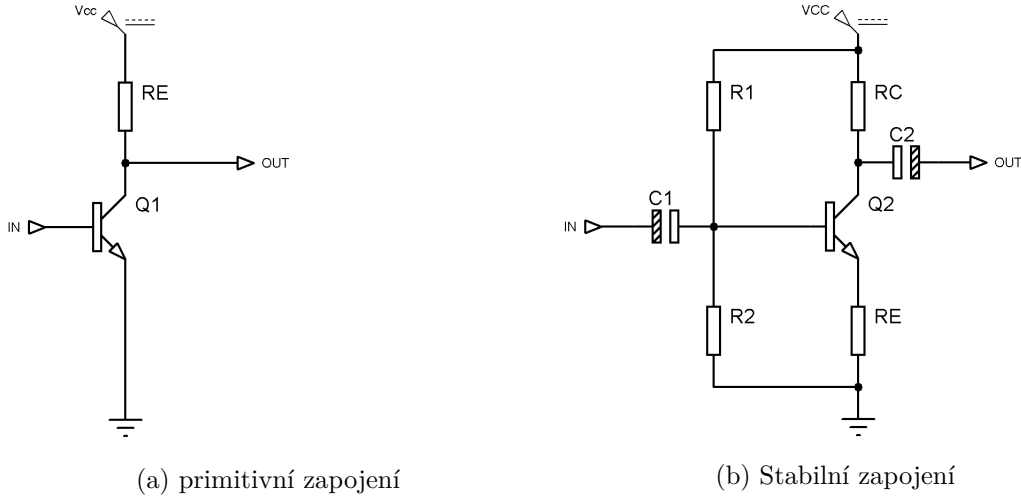
Toto zapojení je mimo jiné používáno k součtu jednotlivých větví vícepásmových korektorů a korekcí typu peak nebo shelving.

2.3 Tranzistorový zesilovač

Tranzistory jsou základními zesilovacími součástkami. tento návrh se bude zabývat pouze bipolárními tranzistory.

2.3.1 Zapojení se společným emitorem

Nejčastěji používané zapojení pro zesilování nízkofrekvenčních signálů je zapojení se společným emitorem. Jako jediné ze tří základních zapojení má totiž podle literatury [4] velké napěťové i proudové zesílení. Zapojení je vyobrazeno na obrázku 2.4a.



Obr. 2.4: Základní zapojení se společným emitorem

Toto základní zapojení je však velmi nedokonalé. Pomocí několika prvků se však dá velmi jednoduše stabilizovat. Stabilizované zapojení je popsáno v literatuře [5] a zobrazeno na obrázku 2.4b. Rezistor R_c slouží k snížení proudu protékajícího kolektorem tranzistoru. Rezistor R_e zavádí takzvanou proudovou zpětnou vazbu. Při větším proudu protékajícím tranzistorem se zvýší proud odporem R_e a tím se sníží napětí mezi bází a emitorem tranzistoru. Poměr těchto dvou prvků převážně určuje napěťové zesílení zapojení podle vzorce 2.4.

$$A_u = \frac{R_c}{R_e} \quad (2.4)$$

Dalšími prvky jsou rezistory R_1 a R_2 . Spolu tvoří napěťový dělič nastavující předpětí zesilovacího stupně. Odpor R_2 hraje také velkou roli v nastavení proudu do báze i_b a tím pádem i v proudovém zesílení. Pro proudové zesílení platí vzorec 2.5.

$$A_u = \frac{R_2}{R_e} \quad (2.5)$$

Podle literatury [5] by nemělo proudové ani napěťové zesílení přesáhnout hodnotu 30, aby byla zachována stabilita zesilovacího stupně. Pokud by to však bylo potřeba, je možné zavést zápornou napěťovou zpětnou vazbu, která pomáhá se stabilizací zapojení.

Dalšími prvky v zapojení jsou kondenzátory C_1 a C_2 . Jedná se o blokové kondenzátory, které oddělují stejnosměrnou složku napájení od vstupu a výstupu zesilovače.

2.3.2 Vstupní a výstupní impedance

Jelikož je vstupní i výstupní impedance závislá na několika součástkách v zapojení, nejjednodušším způsobem jak zjistit jejich hodnoty je pomocí simulace a výpočtů uvedených v literatuře [6]. Pro většinu případů však stačí znát orientační hodnotu vstupní a výstupní impedance a které součástky na ně mají největší vliv.

Na výstupní impedanci má nejvyšší vliv rezistor R_c . Jeho hodnota by tedy neměla být volena příliš vysoká, pokud nebude za zesilovacím stupněm následovat proudový posilovač, který by celkovou výstupní impedanci výrazně snížil.

Na vstupní hodnotu má nejvyšší vliv rezistor R_2 . Jeho velikost je však často obtížné zvyšovat, neboť by bylo potřeba zvýšit i odpor rezistoru R_1 aby byl zachován jejich dělicí poměr. Zvyšování těchto rezistorů však vede k snížení proudu protékajícího děličem a snižuje stabilitu zapojení a šumové poměry. Je však možné vstupní impedanci zvýšit i uměle, a to například pomocí zapojení typu boot-strap.

2.3.3 postup návrhu

Při návrhu je potřeba nejprve znát vstupní hodnoty. Je potřeba znát napájecí napětí U_{cc} , kolektorový proud tranzistoru I_c , proudový zesilovací činitel β a napětí U_{be} .

Prvním krokem je volba rezistoru R_c . Ten je volen tak, aby jím při daném napájecím napětím protékal proud I_c . Výpočet je proveden podle Ohmova zákona pomocí vzorce 2.6.

$$R_c = \frac{U_{cc}}{I_c} \quad (2.6)$$

Dalším krokem je volba emitorového odporu. Ten je volen s použitím vzorce 2.4 tak, aby splňoval požadavky na zesílení.

Následujícím krokem je výpočet napětí báze podle vzorce 2.7.

$$U_b = U_e + U_{be} \quad (2.7)$$

Dále je možné pomocí zesilovacího činitele β zjistit potřebný proud do báze. Výpočet je znázorněn v rovnici 2.8

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} \quad (2.8)$$

Proud děličem I_d je možné zvolit libovolný. Je však třeba brát v úvahu, že příliš velký proud děličem by odváděl velké množství přichozícího signálu odporem R_2 přímo na zem. To by zhoršovalo šumové poměry zesilovače. Proto se proud děličem vždy volí minimálně $10\times$ větší, než proud báze I_b .

Je-li znám proud děličem a potřebné napětí báze U_b , je možné vypočítat velikost odporu R_2 a to podle vzorce 2.9.

$$R_2 = \frac{U_b}{I_d} \quad (2.9)$$

Posledním krokem je zjištění velikosti odporu R_1 podle vzorce 2.10.

$$R_1 = \frac{(U_{cc} - U_b)}{(I_d + I_b)} \quad (2.10)$$

Když je návrh hotov, je nezbytné vypočtené součástky nahradit součástkami vybranými z řady a posléze zkontrolovat, zda se pracovní bod příliš neposunul.

2.4 Kmitočtové filtry

Pro tvorbu kmitočtových filtrů se využívají kondenzátory a cívky. Ve většině případů je však snaha vyhnout se cívkám kvůli jejich velikosti, parazitním jevům a ceně. Proto bude v návrhu využito výhradně kondenzátorů pro realizaci kmitočtových filtrů.

2.4.1 Dolní propust, horní propust

Dvěma základními filtry jsou horní propust a dolní propust. Realizují se RC a CR články. V navrhovaném zařízení bude stačit použití filtrů prvního řádu, nebudou-li filtry převzaté z literatury. Filtry prvního řádu mají pod, nebo nad mezní frekvencí útlum -20 dB/dek. Pro RC i CR článek platí pro výpočet mezní frekvence vztah 2.11 z literatury [7].

$$f = \frac{1}{(2\pi RC)} \quad (2.11)$$

Kombinací horních a dolních propustí je možné vytvořit pásmovou propust a pásmovou zadrž.

2.4.2 RIAA Korekce

RIAA korekce je korekce používaná v zesilovačích určených pro zesilování gramofonového záznamu. U magnetofonových záznamů jsou zejména dolní kmitočty náchylné na nežádoucí jevy. Proto jsou nízké frekvence při záznamu potlačovány podle normy RIAA. Při přehrávání je tedy nutné tyto korekce opět zesílit. Tvar kmitočtové charakteristiky RIAA je tedy použit při zápisu i při záznamu, avšak při zápisu je křivka invertovaná. Hodnoty časových konstant a lomových frekvencí jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Časové konstanty a lomové frekvence charakteristiky RIAA

Konstanta	Hodnota	Jednotka
τ_1	3180	μs
τ_2	318	μs
τ_3	75	μs
f_1	50	Hz
f_2	500	Hz
f_3	2, 12	kHz

3 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

V této kapitole je uveden postup návrhu vstupního audio zesilovače s kmitočtovými korekcemi.

3.1 Blokové schéma

Jako první je potřeba se rozhodnout jaké funkční bloky budeme navrhovat a v jakém pořadí je budeme zapojovat. Jelikož je požadavek mít na vstupu napětí v rozmezí 10 mV až 10 V, jako prvním článkem v řetězci by měl být atenuátor. Kdyby se totiž napětí 10 V dostalo na vstup zesilovače, který by měl za úkol jej zesílit stokrát, museli bychom mít napájecí napětí minimálně 1000 V a vyšší, aby nedošlo k ořezání signálu. Takto vysokou hodnotu symetrického napájení by nebylo ani možné v laboratořích dosáhnout. Proto jako první článek zapojíme atenuátor, který utlumí vstupní signál na hodnoty desítek milivoltů.

Dalšími články by měly být samotné zesilovače. Kdybychom totiž přivedli signál z atenuátoru nejdříve do frekvenčních korekcí, riskujeme, že korekce které signál zeslabují by snížily úroveň signálu na příliš malé hodnoty. Například korekce RIAA má na vysokých frekvencích definovaný útlum -20 dB. To by znamenalo, že by na vstup zesilovače mohl přijít signál o velikosti 1 mV. Tak nízký signál už by nemusel být zesilovačem správně zesilován. Proto, v rámci zachování šumových poměrů zařadíme za atenuátor zesilovače. V zadání je požadavek mezi zesilovači přepínat. Nikdy proto nebudou v činnosti oba zesilovače naráz. Proto bude výhodné zesilovače zapojit paralelně a vždy vybírat jen ten zesilovač, který chceme aby byl aktivní.

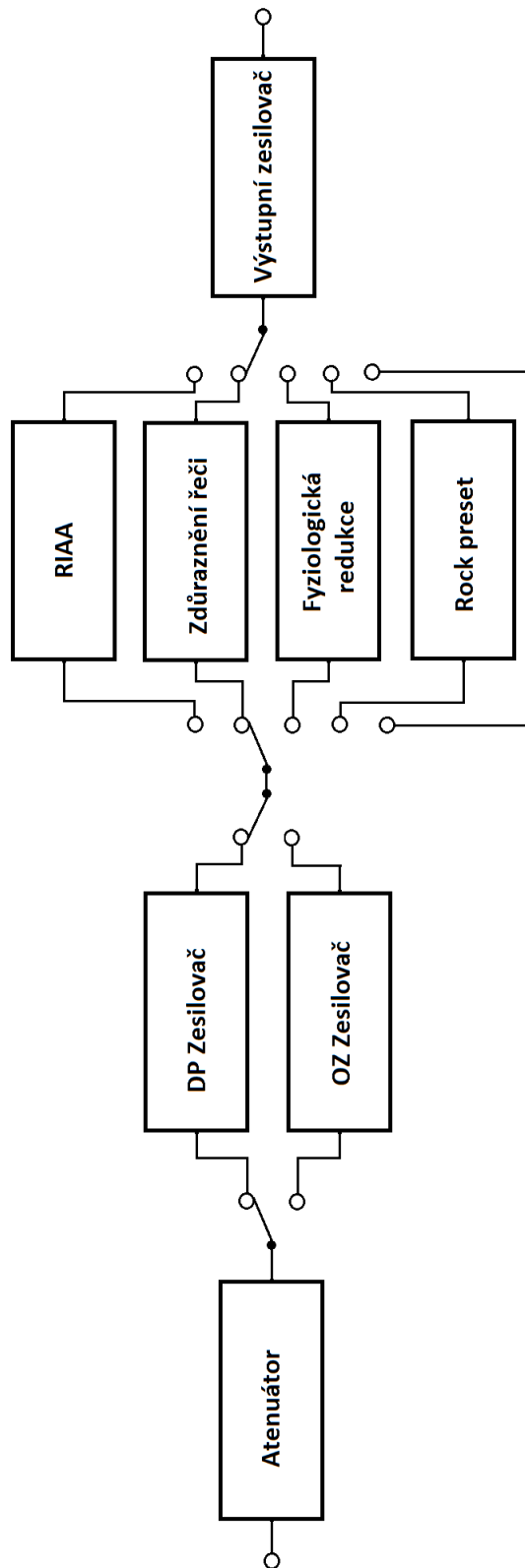
Logicky následujícími prvky tedy jsou frekvenční korekce. Signál na výstupu zesilovačů už se bude pohybovat kolem 1 V. Je tím pádem prostor i pro útlum signálu. Korekcí by opět nemělo být v činnosti více najednou, proto je budeme řadit paralelně, nikoliv sériově. Nesmíme také zapomenout na možnost korekce zcela vypnout. Proto musí být i jedna cesta přímo propojující zesilovače s blokem následujícím za korekcemi.

Jako poslední blok bude zařazen výstupní zesilovač. Tento blok bude sloužit čistě na oddělení obvodů korekcí od výstupu a pro zvýšení proudového zesílení, aby bylo možné výstup zařízení připojit k nízkým zátěžím.

Celé blokové schéma je znázorněno na obrázku 3.1.

3.2 Atenuátor

Při návrhu atenuátoru je potřeba zohlednit několik faktorů. Prvním z nich je impedanční přizpůsobení. Atenuátor nesmí způsobit změnu vstupního odporu navrženého zařízení. A to ani při zapnutí, ani při změně útlumového členu. Dále musí být výstup atenuátoru impedančně přizpůsoben bloku následujícímu za útlumovými články. Z těchto nároků můžeme dedukovat požadované hodnoty vstupní a výstupní impedance navrženého bloku. Podle zadání má být vstupní impedance celého zařízení v rozmezí (10 – 100) k Ω . Vstupní impedance navrženého atenuátoru musí tedy být pro všechny útlumové články v tomto



Obr. 3.1: Blokové schéma navrhovaného zařízení

rozmezí hodnot. Výstupní impedance bloku musí být minimálně třikrát, ideálně alespoň desetkrát menší než vstupní impedance následujícího bloku. V tomto případě by však měla být výstupní impedance stejná jako vnitřní impedance generátoru, tedy 50Ω . To zajistí, že se nezmění impedanční přizpůsobení při vypnutí útlumových členů.

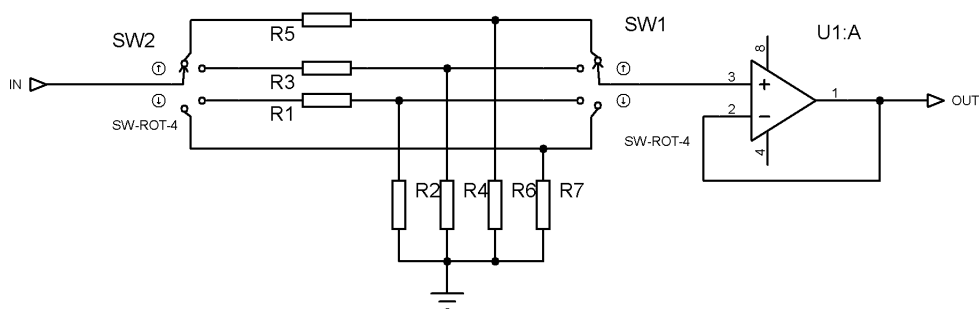
Další faktor, který je potřeba uvažovat při návrhu je požadovaný útlum. Zadání nám určuje přepínatelné útlumy -20 dB , -40 dB a -60 dB s možností vypnutí útlumových článků, tedy s možností útlumu -0 dB . Při návrhu útlumových členů musíme počítat s výkonovými ztrátami, které budou na rezistorech probíhat. Největší problém by mohl nastat u útlumového článku -60 dB , který musí počítat se vstupním napětím až 10 V .

Vstupní impedance zesilovače byla zvolena $Z_{in} = 51 \text{ k}\Omega$. Tento nárok tedy platí i pro vstupní impedanci attenuátoru. Výstupní impedance by měla být 50Ω . Pomocí vzorce pro výpočet minimálního možného útlumu pro dané impedanční přizpůsobení 3.1 z literatury [8] zjistíme, zda je možné toto zadání splnit pomocí pasivního útlumového článku.

$$K_{min} = 20 \log \left(\sqrt{\frac{Z_{in}}{Z_{out}}} + \sqrt{\frac{Z_{in}}{Z_{out}} - 1} \right) \quad (3.1)$$

Pro zadané hodnoty je minimální možná hodnota útlumu $36,1 \text{ dB}$. To znamená, že jednoduchým pasivním útlumovým článkem požadovaných výsledků není možné dosáhnout, jelikož není možné se zadanými hodnotami impedancí sestavit útlumový článek -20 dB . Proto je nutné přejít k alternativním řešením.

Jednou z možností je použít útlumový článek, který splní požadavky na vstupní impedanci, a za takto navržený článek připojit napěťový sledovač. Vstupní impedance napěťového sledovače se pohybuje v řádech $\text{M}\Omega$ a proto je možné zanedbat výstupní impedanci útlumového členu. Proto je možné využít nejjednodušší konfigurace útlumového článku, tedy konfigurace L znázorněné na obrázku 2.1a. Výstupní impedance napěťového sledovače je v řádech desítek ohmů. Definované nároky na vstupní a výstupní impedanci navrhovaného attenuátoru jsou tedy splněny. Zapojení je znázorněno na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Zapojení attenuátoru

Rezistory R_1 a R_2 tvoří napěťový dělič pro útlum -20 dB, R_3 a R_4 -40 dB a R_5 spolu s R_6 tvoří útlumový článek s útlumem -60 dB. Rezistor R_7 slouží k nastavení vstupní impedance při nulovém útlumu. Hodnoty odporů rezistorů jsou vypočítány podle vzorce 2.1 tak, aby jejich sériová kombinace - hodnota vstupní impedance - byla vždy 51 k Ω . Hodnota odporu rezistoru R_7 je rovna hodnotě požadované vstupní impedance. Vypočítané hodnoty odporů použitých v atenuátoru jsou v tabulce 3.1.

Tab. 3.1: Hodnoty součástek atenuátoru

Rezistor	Hodnota	Jednotka
R_1	47	k Ω
R_2	5,1	k Ω
R_3	51	k Ω
R_4	510	Ω
R_5	51	k Ω
R_6	51	Ω
R_7	51	k Ω

3.3 Zesilovač s operačním zesilovačem

Při návrhu zesilovače tvořeného operačním zesilovačem je možné zvolit jedno ze dvou základních zapojení. Zapojení invertujícího a zapojení neinvertujícího. Zapojení neinvertující je výhodné, pokud je požadavek, aby zesílení bylo za určitých podmínek menší než 1. Tento zesilovač však bude mít za úkol signál pouze zesilovat bez možnosti nastavení velikosti zesílení. Proto je výhodnější při návrhu vycházet z neinvertujícího zapojení operačního zesilovače 2.2a.

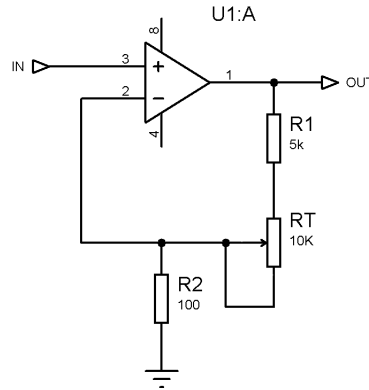
Nároky na navrhovaný zesilovač jsou následující. Zesílení $+40$ dB, nízká výstupní impedance, rovná frekvenční charakteristika ve slyšitelném pásmu, tedy od 20 Hz do 20 kHz s tolerancí $\pm 1,5$ dB. Vzhledem k faktu, že předchozí blok má na výstupu napěťový sledovač s velmi nízkou výstupní impedancí, není potřeba řešit vstupní odpor zesilovače, pokud je vyšší než zhruba 500 Ω . K dispozici je symetrické napětí ± 12 V, proto není potřeba řešit předpětí operačního zesilovače. Přesto však byl na výstup zařazen filtr proti stejnosměrným napětím. Ten slouží k odfiltrování stejnosměrných proudů vzniklých napěťovou nesymetrií vstupů.

Při návrhu je dobré začít zpětnovazební větví. Ta má totiž největší vliv na funkci operačního zesilovače. Zpětnovazební odpor R_1 byl zvolen 10 k Ω . Je tedy možné podle upraveného vzorce 2.2 vypočítat odpor R_2 .

$$R_2 = \frac{R_1}{(A_u - 1)} = \frac{10000}{(100 - 1)} = 101,01 \Omega$$

Odpor R_2 byl vypočítán na hodnotu $101,01$ Ω . Z řady byl tedy zvolen nejbližší možný odpor 100 Ω . Aby bylo možné zajistit přesné zesílení, rezistor R_1 je rozdělen na odpor R_1

a trimr R_T . Hodnotu R_1 zvolíme $5\text{ k}\Omega$. Velikost trimru je $10\text{ k}\Omega$. Pokud bude tedy trimr ve střední poloze, součet odporů bude výchozích $10\text{ }\Omega$. Změnou polohy potenciometru bude však možno nastavit zesílení v rozmezí od 50 do 150. Zapojení je znázorněno na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Návrh zpětné vazby zesilovače s operačním zesilovačem

Další součástí návrhu je filtr proti stejnosměrné složce. Tento filtr je zařazen na výstup a realizován pomocí filtru typu horní propust tvořeného kondenzátorem na výstupu a odporem zátěže. Vzhledem k tomu, že za zesilovačem bude vždy zařazen výstupní zesilovač, nebo jeden z filtrů, můžeme si určit velikost zátěže a díky tomu spočítat velikost kondenzátoru filtru. Pro výpočet kondenzátoru ve filtru typu horní propust platí rovnice 3.2 odvozená ze vztahu 2.11.

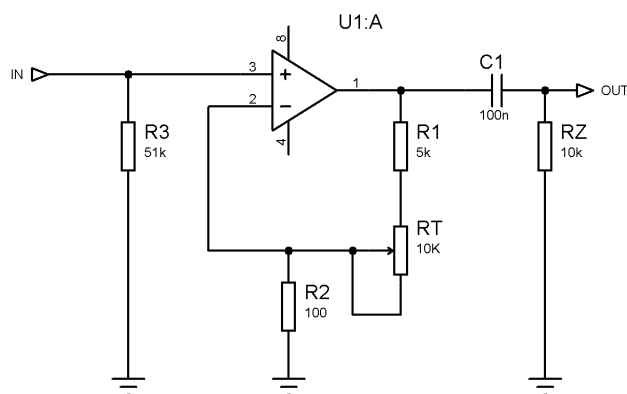
$$C_1 = \frac{1}{(2\pi R_z f_0)} \quad (3.2)$$

Odpor zátěže R_z byla zvolena $10\text{ k}\Omega$. Mezní frekvenci musíme volit pod 20 Hz , aby neovlivňovala slyšitelné pásmo, ale nad 1 Hz , aby byl útlum dostatečný. Mezní kmitočet byl tedy definován na 5 Hz . Podle rovnice 3.2 lze vypočítat C_1 .

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi \cdot 10000 \cdot 5)} = 3,183\text{ }\mu\text{F}$$

Kapacita kondenzátoru C_1 byla spočtena na hodnotu $3,183\text{ }\mu\text{F}$. Z řady byla tedy zvolena kapacita $3,3\text{ }\mu\text{F}$.

Poslední součástku zahrnutou do návrhu je rezistor R_3 určující vstupní odpor zesilovače. Jelikož je výstupní impedance atenuátoru velmi nízká, nebylo by potřeba tento odpor vůbec do návrhu zařazovat. Jelikož je však požadavek zesilovač odpojovat, je výhodné zařadit na vstup odpor, přes který bude po odpojení zesilovače vstup připojen k zemi. Tím je zamezeno vstupu rušení do odpojeného zesilovače. Odpor R_3 byl definován na hodnotu $51\text{ k}\Omega$. Celkový návrh je na obrázku 3.4. Simulace zapojení je na obrázku A.1.



Obr. 3.4: Celkový návrh zesilovače s operačním zesilovačem

3.4 Zesilovač s diskretními prvky

Jako výchozí součástka byl vybrán tranzistor BC546B Jeho parametry jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tab. 3.2: Parametry tranzistoru BC546B

Parametr	Hodnota	Jednotka
U_{be}	0,65	V
I_c	2	mA
β	180	-

Jelikož výchozí zapojení bylo zvoleno zapojení se společným emitorem ve třídě A, využijeme jen kladnou část napájení. Platí tedy $U_{cc} = 12\text{ V}$. Na vstupu tranzistoru je očekávané napětí 10 mV . Vzhledem k tomu, že jedním stupněm nedosáhneme požadovaného zesílení $+40\text{ dB}$, první stupeň bude navrhovaný s důrazem na stabilitu a malé zkreslení. Proto bylo zvoleno napětí $U_{ce} = 2\text{ V}$. První stupeň bude zesilovat maximálně $20\times$, aby byl pokud možno co nejvíce stabilní. To znamená, že na výstupu bude maximální rozkmit 200 mV . Napětí $U_{ce} = 2\text{ V}$ je proto plně dostačující. Je tedy možné vypočítat velikost odporu R_c podle vzorce 2.6.

$$R_c = \frac{U_{cc} - U_{ce}}{I_c} = \frac{12 - 2}{10\text{m}} = 5\text{ k}\Omega$$

Odpor R_c byl zvolen $130\ \Omega$. Dalším krokem je vypočítání U_b a I_b podle upraveného vzorce 2.7 a vzorce 2.8

$$U_b = U_e + U_{be} = I_e \times R_e + U_{be} = (\beta + 1) \left(\frac{I_c}{\beta} \right) R_e + U_{be} = (180 + 1) \left(\frac{2\text{m}}{180} \right) \times 130 + 0,65 = 0,9114\text{ V}$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = 11,11\ \mu\text{V}$$

Dalším úkolem je zvolit proud protékající děličem tvořeným odpory R_1 a R_2 . Ten by měl být minimálně $10\times$ větší, než proud báží. Pro naše účely bylo zvoleno $60\times$ větší, abychom zamezili příliš velkému proudovému zesílení a tím snížení stability. Proud děličem I_d tedy bude $666,6\ \mu\text{A}$

Následně je potřeba vypočítat odpor R_2 podle 2.9.

$$R_2 = \frac{U_b}{I_d} = \frac{0,9114}{666,6\mu} = 1367\ \Omega$$

Nyní je možné zkontrolovat zesílení navrženého stupně. Proudové zesílení, tedy $\frac{R_2}{R_e}$ podle 2.5 je $10\times$. Napětové zesílení, tedy $\frac{R_c}{R_e}$ podle 2.4 vychází $38,56\times$. V tomto případě by zesílení bylo příliš vysoké. Proto bylo rozhodnuto rozdělit odpor R_c na dva odpory, odpor $R_3 = 4\ \text{k}\Omega$ a odpor $R_C = 1\ \text{k}\Omega$. Mezi těmito dvěma odpory bude připojen odpor R_1 nastavující předpětí. Mimo to bude však přes odpor R_1 vedena napěťová záporná zpětná vazba, která sníží zesílení stupně, ale rapidně zvýší jeho stabilitu. Toto zapojení je popsáno v literatuře [6]. Velikost odporu R_1 byla definována na $6\ \text{k}\Omega$.

Po upravení velikosti odporů některých součástek podle hodnot dostupných rezistorů, byly přidány kondenzátory C_1 a C_2 oddělující stejnosměrnou složku od vstupu a výstupu stupně. Celkové zapojení prvního stupně je na obrázku 3.5a.

Takto zapojený zesilovač má zesílení $+26,5\ \text{dB}$ a vstupní impedanci kolem $1\ \text{k}\Omega$. Má však poměrně vysokou výstupní impedanci. Proto bude druhý stupeň navrhován tak, aby zesiloval více. Tak budou vykompenzovány ztráty způsobené nedokonalým impedančním přizpůsobením.

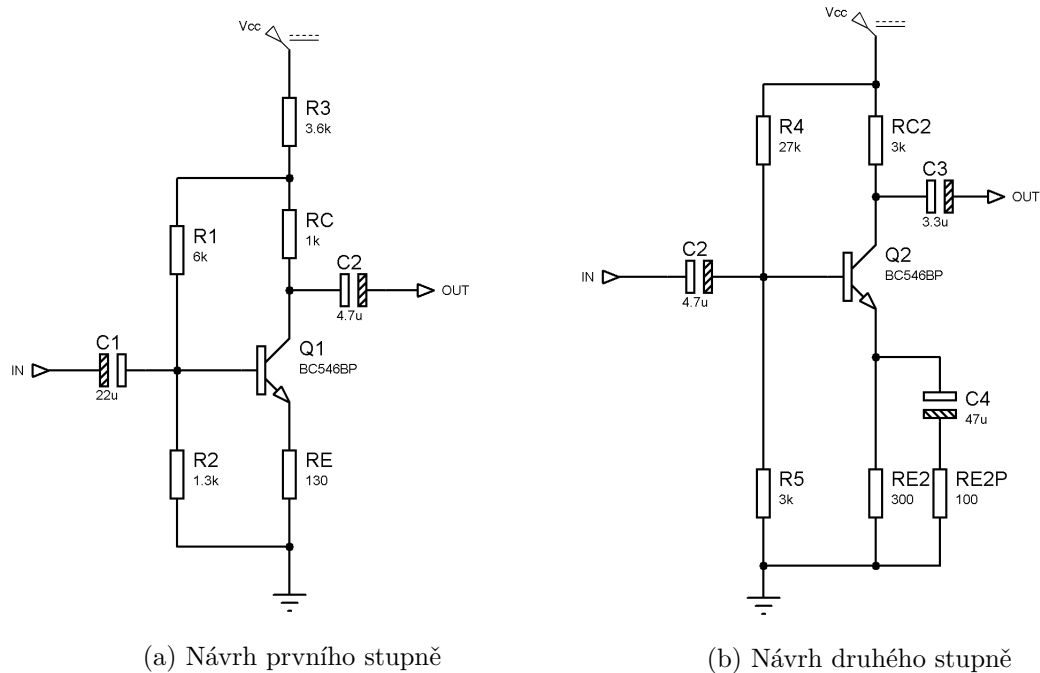
Při návrhu druhého stupně je postup velmi podobný návrhu prvního stupně. Tentokrát však není kladen důraz na stabilitu ale na zesílení. Napětí U_{ce} je tentokrát voleno kolem $6\ \text{V}$, aby byl možný velký rozkmit. Výsledky výpočtu součástek druhého stupně jsou v tabulce 3.3.

Tab. 3.3: Hodnoty rezistorů návrhu druhého stupně zesilovače s diskretními prvky

Parametr	Hodnota	Jednotka
R_{c2}	3	$\text{k}\Omega$
R_{e2}	300	Ω
R_4	27	$\text{k}\Omega$
R_5	3	$\text{k}\Omega$

Tento návrh však nemá velké zesílení. Proudové zesílení, tedy $\frac{R_5}{R_{e2}}$ podle 2.5 je pouze $11,11\times$, napětové zesílení, tedy $\frac{R_{c2}}{R_{e2}}$ podle 2.4 je jen $10\times$. Proto je zavedena frekvenčně závislá proudová zpětná vazba podle literatury [5]. Paralelně k odporu R_{e2} byl připojen odpor R_{e2p} oddělený kondenzátorem C_4 . tento rezistor bude ovlivňovat zesílení střídavých signálů, zatímco stejnosměrný signál je odfiltrován kondenzátorem a tudíž zůstane nezměněn. Velikost odporu R_{e2p} by bylo možné zvolit tak, aby zesílení obou stupňů bylo požadovaných $+40\ \text{dB}$. Místo toho však bylo rozhodnuto tento odpor zvolit ještě menší, tedy $R_{e2p} = 100\ \Omega$, aby bylo zesílení celého zesilovače vyšší než požadované.

Na výstup zesilovače byl opět zapojen kondenzátor na oddělení stejnosměrné složky z napájení. Jeho hodnota byla zvolena stejná, jako u zesilovače s operačním zesilovačem, tedy $C_3 = 3,3 \mu\text{F}$. Zapojení je znázorněno na obrázku 3.5b.



(a) Návrh prvního stupně

(b) Návrh druhého stupně

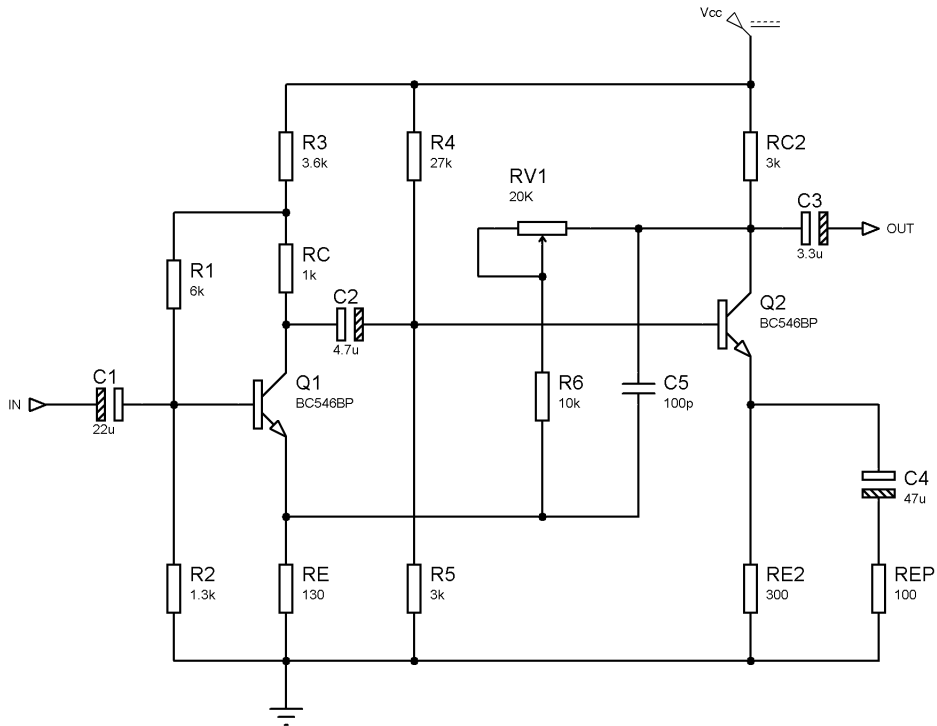
Obr. 3.5: Navržené stupně zesilovače s diskretními prvky

Zesílení spojených stupňů není přímo jejich součtem, jelikož nejsou přesně impedančně přizpůsobeny. S tím se však při návrhu počítalo, proto je celkové zesílení $+49,5 \text{ dB}$. Toto zesílení je větší, než požadované zesílení. Můžeme jej však snížit zapojením záporné zpětné vazby z výstupu na spoj mezi emitorem prvního tranzistoru a odporem R_e . Takto zavedená zpětná vazba bude zlepšovat stabilitu a přenosovou charakteristiku zesilovače. Proto byl druhý stupeň navrhován s vyšším zesílením, než bylo potřeba. Simulací bylo zjištěno, že velikost zpětnovazebního odporu musí být $R_6 = 21,2 \text{ k}\Omega$. Rezistor byl opět rozdělen na rezistor $R_6 = 10 \text{ k}\Omega$ a trimr $R_T = 20 \text{ k}\Omega$, aby bylo zesílení nastavitelné.

Paralelně k odporu R_6 a trimru R_T byl navíc přidán kondenzátor $C_5 = 100 \text{ pF}$, který sníží zesílení zesilovače na vysokých frekvencích. Tím se zamezí vysokofrekvenčnímu rušení. Celý obvod je znázorněn na obrázku 3.6.

Vstupní impedance sestaveného zesilovače není příliš vysoká. Pro samostatný zesilovač by byla vstupní impedance naprosto nevyhovující a musel by se uměle zvedat vstupní odpor, například pomocí obvodu typu bootstrap. Toho však v tomto případě není zapotřebí, jelikož zesilovač je připojen přímo k operačnímu zesilovači v předchozím bloku. Ten je schopen bez přetížení snést nízké odpory. Proto je možné nechat zapojení bez umělého zvyšování vstupní impedance.

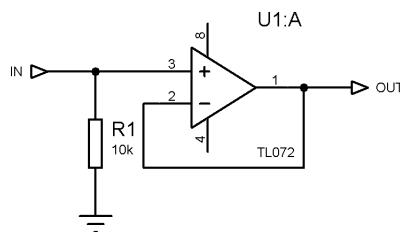
Simulace zapojení je na obrázku A.1



Obr. 3.6: Celkový návrh zesilovače s diskretními prvky

3.5 Výstupní zesilovač

Pro návrh výstupního zesilovače byl použit operační zesilovač v zapojení napěťový sledovač. Jeho účelem je pouze oddělení obvodů předchozích bloků od výstupu. Proto bude stačit zesílení 0dB. K výstupnímu zesilovači by také bylo možné zapojit horní a dolní propust, která by omezovala přenos jen na slyšitelné pásmo a tím pádem filtrovala rušivé složky. Tyto korekce jsou však již součástí zesilovačů předchozích. Proto není třeba se těmito filtry zabývat. Je však potřeba ošetřit velikost vstupní impedance. Při návrhu předchozích zesilovačů byla definována velikost zátěže na 10 k Ω . Výstupní zesilovač je pro tyto zesilovače zátěží a proto je nutné, aby byla tato podmínka splněna. Vstupní impedance 10 k Ω je zajištěna odporem R_1 na vstupu, která přímo ovlivní vstupní impedanci zesilovače. Jeho hodnota je proto 10 k Ω . Návrh výstupního zesilovače je na obrázku 3.7.



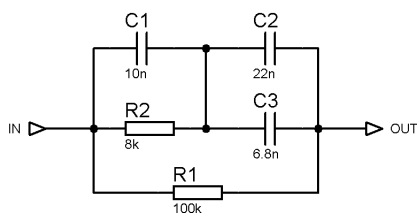
Obr. 3.7: Celkový návrh výstupního zesilovače

3.6 Frekvenční korekce

Korekční zesilovače budou zapojeny před výstupní zesilovač. Všechny tedy musí mít vstupní impedanci $10\text{ k}\Omega$. Vzhledem k tomu, že se korekce mají vypnout, musela být vstupní impedance výstupního zesilovače snížena na $10\text{ k}\Omega$. Proto je potřeba, aby výstupní impedance všech korekcí byla nejméně $10\times$ menší, tedy maximálně $1\text{ k}\Omega$.

3.6.1 RIAA

Z literatury [9] bylo vybráno Linely-Hoodovo zapojení 3.8. To má nejmenší odchylku od ideální křivky korekce. Odchylka je $0,3\text{ dB}$



Obr. 3.8: Linely-Hoodovo zapojení korekčního dvojpólu RIAA

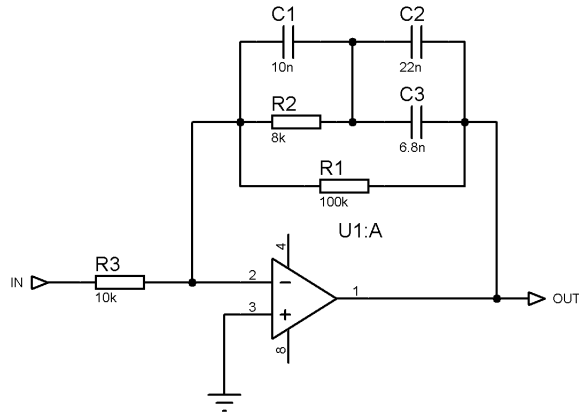
Linely-Hoodův dvojpól bude zapojen do zpětné vazby operačního zesilovače. Jelikož je na vyšších kmitočtech potřebné zesílení menší než 0 dB , je nutné použít invertující zapojení operačního zesilovače. Nastavením velikosti odporu rezistoru R_3 je možné regulovat zesílení celé korekční větve. Zesílení napomůže splnění podmínky v zadání, která říká, že zesílení na 1 kHz musí být vždy stejné pro všechny korekce i bez korekcí. Proto je na frekvenci 1 kHz požadováno zesílení 0 dB . Je však potřeba dodržet podmínku o velikosti vstupní impedance. V tomto případě zajistí nulové zesílení odpor $10\text{ k}\Omega$. Tento odpor přímo určuje vstupní impedanci, podmínka je tedy splněna. Vzhledem k tomu, že byl použit operační zesilovač, výstupní impedance je velmi nízká a není tedy potřeba se jí zabývat. Celkové zapojení je na obrázku 3.9. Simulace zapojení je na obrázku A.2.

3.6.2 Rock preset

Kmitočtová korekce rockového presetu nemá přesně definované parametry. Tuto korekci si každá firma definuje podle svých požadavků a preferencí. Navrhovaná korekce bude inspirována rockovým presetem equalizeru mobilní aplikace NRG player. Tvar této korekce se dá vyčíst z tabulky 3.4.

Korekce bude realizována pomocí pásmové zadržky. Jelikož je potřebné jiné zesílení pro kmitočty pod a nad středním kmitočtem, bude využito rozdělení signálu do dvou větví, jedna pro horní propust, jedna pro dolní propust. Signály se pak sečtou na vstupu součtového zesilovače realizovaného operačním zesilovačem v invertujícím zapojení.

Na vstup korekčního bloku byl zařazen sériový odpor R_1 . Ten přemění napětí na proud, který je možný rozdělit do dvou větví. Na velikosti tohoto rezistoru nezáleží. Zvolíme jej



Obr. 3.9: Celkové zapojení korekčního bloku RIAA

Tab. 3.4: Kmitočtová charakteristika Rock Presetu aplikace NRG player

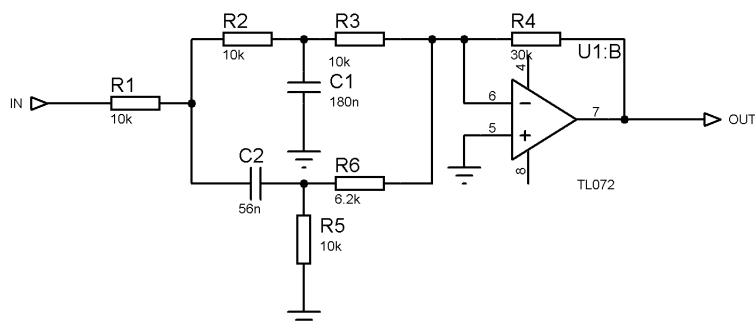
f [Hz]	A [dB]
20	+3
200	-3
2000	+4
20000	+4

však poměrně velký, aby byla vstupní impedance větší, než 10 k Ω . Jeho velikost byla určena na 10 k Ω . Dále bude zapojení pokračovat dolní propustí tvořenou RC článkem, za kterým bude následovat rezistor R_3 ten bude sloužit k nastavení zesílení této větve. Bude však i nepřímo ovlivňovat vlastnosti dolní propusti, proto je potřeba s ním počítat. Jeho velikost byla definována na 10 k Ω . Rezistor v dolní propusti byl rovněž zvolen 10 k Ω . Nyní je možné vypočítat velikost kapacity kondenzátoru C_1 v RC článku dolní propusti. Výchozí vzorec je vzorec 3.2. RC Filtr prvního řádu má útlum -3dB/Okt . Oproti spodním kmitočtům je požadovaný útlum na 200 Hz -6dB . Proto nebude mezní kmitočet 200 Hz, ale bude o oktávu nižší, tedy 100 Hz.

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi R_2 f_0)} = \frac{1}{(2\pi \cdot 10000 \cdot 100)} = 159\text{ nF}$$

V tomto případě však bude velikost odporu v RC článku ovlivněn ostatními rezistory a odporem druhé větve. Proto z tabulky vybereme vyšší hodnotu kondenzátoru, abychom toto ovlivnění eliminovali. Vybraná kapacita je tedy 180 nF.

Podobným způsobem se bude postupovat při návrhu druhé větve. Tato větev bude tvořena horní propustí tvořenou RC článkem a odporem R_6 nastavujícím zesílení. Odpor R_6 musí být však menší, než odpor v první větvi, aby bylo zajištěno vyšší zesílení této větve. Celkové zapojení i s vypočtenými hodnotami druhé větve je znázorněno na obrázku 3.10.



Obr. 3.10: Celkové zapojení Rock presetu

Aby byla splněna podmínka zesílení 0 dB na kmitočtu 1 kHz, zpětnovazební odpor R_4 byl nastaven na hodnotu 40 k Ω .

Simulace zapojení je na obrázku A.2.

3.6.3 Zdůraznění řeči

Korekci zdůraznění řeči budeme realizovat pomocí pásmové propusti. Jelikož je na výstupu požadovaný zdvih zesílení v rozmezí od 3 kHz do 5 kHz, bude potřeba použít aktivní pásmovou propust. Vzhledem k tomu, že na dolních frekvencích je požadováno zesílení menší, než 0 dB, je potřeba vycházet z invertujícího zapojení operačního zesilovače.

Nabízí se začít horní propustí. Ta je realizována sériovým zapojením rezistoru a kapacitoru na vstupu. Jelikož rezistor na vstupu přímo definuje vstupní odpor článku, jeho velikost je definována požadavkem na vstupní impedanci 10 k Ω . Mezní frekvence filtru je pro výpočet definována na 3 kHz a poté bude z řady vybrán kapacitor s nejbližší vyšší kapacitou. Tím zajistíme, že se mezní frekvence nedostane nad 3 kHz. Následuje výpočet podle rovnice 3.2.

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi R_1 f_0)} = \frac{1}{(2\pi \cdot 10000 \cdot 3000)} = 5,3 \text{ nF}$$

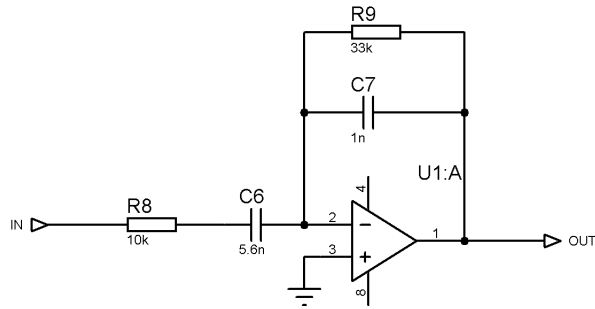
Výpočet určil velikost kondenzátoru C_1 na hodnotu 5,3 nF. Z řady tedy byla vybrána hodnota 5,6 nF.

Nyní je potřeba určit zesílení celého bloku. To nám zajistí zpětnovazební odpor R_2 . Opět je kladen nárok na zesílení 0 dB na kmitočtu 1 kHz. Simulací bylo zjištěno, že se tomuto zesílení nejlépe blíží zapojení s rezistorem o hodnotě 33 k Ω .

Posledním prvkem který zbývá navrhnout je kondenzátor C_2 . Ten bude zapojen ve zpětné vazbě paralelně k odporu R_2 a spolu s ním bude tvořit dolní propust. Mezní frekvence bude tentokrát 5 kHz. Výpočet je opět proveden na základě rovnice 3.2.

$$C_2 = \frac{1}{(2\pi R_2 f_0)} = \frac{1}{(2\pi \cdot 33000 \cdot 5000)} = 0,96 \text{ nF}$$

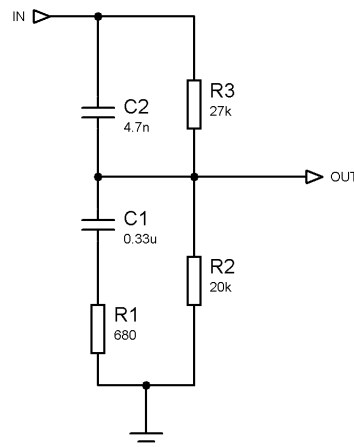
Z řady je tedy vybrána hodnota kapacity pro kondenzátor $C_2 = 1 \text{ nF}$. Celkové zapojení návrhu korekce je na obrázku 3.11. Simulace zapojení je na obrázku A.2



Obr. 3.11: Celkové zapojení korekce zdůraznění řeči

3.6.4 Fyziologická korekce

Z literatury [10] bylo vybráno zapojení fyziologické redukce. Toto zapojení bylo však potřeba modifikovat, protože bylo navrhováno jako regulátor hlasitosti a nejen pevně daná korekce. Proto byl potenciometr nahrazen odpory R_2 a R_3 . Hodnoty jejich odporů byly stanoveny na $R_2 = 20\text{ k}\Omega$, $R_3 = 27\text{ k}\Omega$, tedy zhruba v polovině rozsahu. Viz. 3.12.



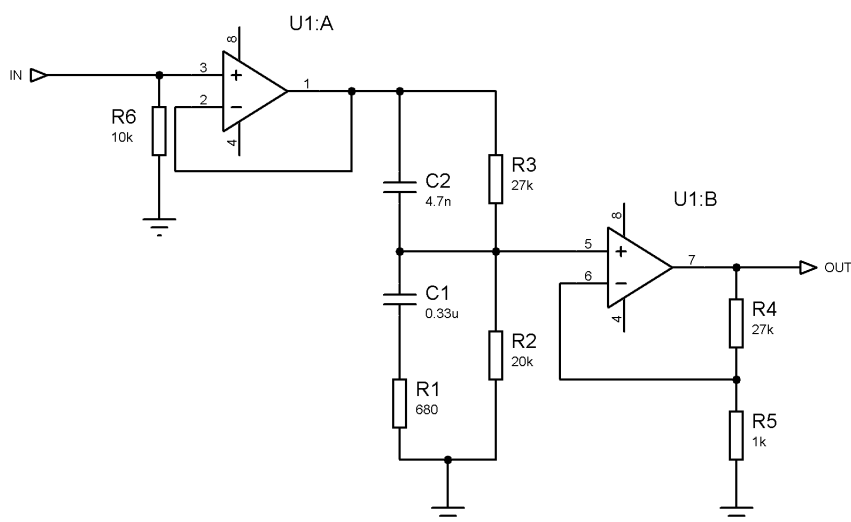
Obr. 3.12: Fyziologický regulátor hlasitosti s pevným útlumem

Tento regulátor pouze tlumí vstupní signál. Je tedy potřeba utlumený signál zesílit, aby byla splněna podmínka zisku 0 dB na frekvenci 1 kHz. Proto je nutno za fyziologický regulátor s pevným útlumem vřadit zesilovač. Mohlo by se sice zdát, že výhodnější by bylo vřadit zesilovač před regulátor, abychom pomocí něj nastavili vstupní impedanci na požadovaných 10 k Ω . Je však potřeba myslet na možné přebuzení zesilovače. Vzhledem k tomu, že na vstup korekce je očekávaný signál o velikosti 1 V, a požadované zesílení je kolem 29 dB, výstupní signál za zesilovačem tedy bude přes 27 V. K dispozici je napájecí napětí $\pm 12\text{ V}$. Signál by tedy mohl být limitován. Proto bude zesilovač zařazen až za redukcí.

Jako zesilovač bude použito neinvertující zapojení operačního zesilovače. Jelikož by

rezistor R_5 neměl mít příliš malou hodnotu, aby jím netekly vysoké proudy a zbytečně se nepřehříval, velikost jeho odporu byla zvolena na $1\text{ k}\Omega$. Dále je potřeba zjistit velikost zpětnovazebního odporu R_4 . Za pomoci simulace byla hodnota odporu definována na $27\text{ k}\Omega$. Zesílení je tedy podle vzorce 2.2 $27\times$. Při tomto zesílení je splněna podmínka zisku 0 dB na frekvenci 1 kHz .

Zbývá ještě vyřešit vstupní impedanci. U tohoto zapojení je potřeba vřadit na vstup napěťový sledovač, který oddělí kapacitory použité v obvodu korekce od součástek předchozích zesilovačů. Odpořem R_6 je možné nastavit vstupní impedanci, hodnota tohoto odporu tedy bude $10\text{ k}\Omega$. Celkové zapojení je na obrázku 3.13. Simulace zapojení je na obrázku A.2.



Obr. 3.13: Celkové zapojení fyziologické korekce hlasitosti

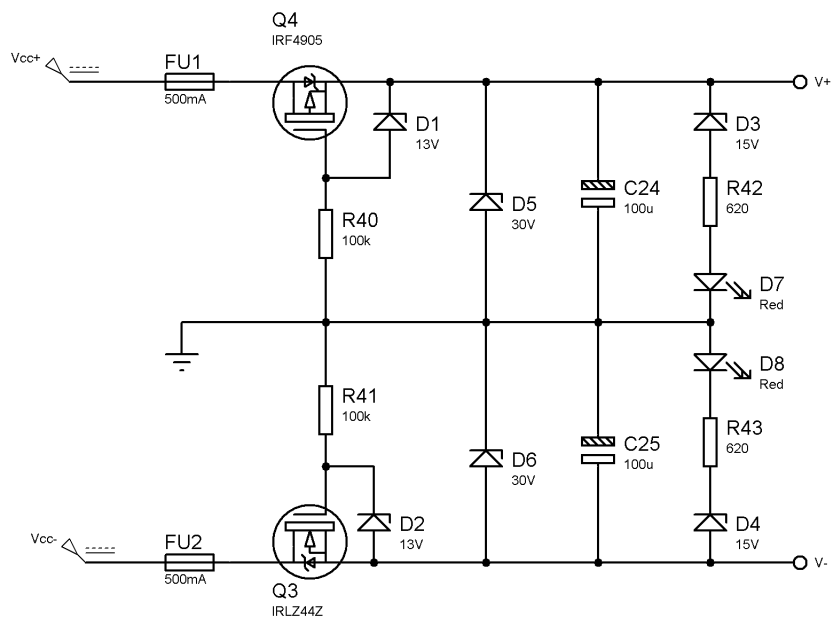
3.7 Napájení

Zesilovač byl vybaven i obvody pro napájení. Jelikož bude zařízení napájeno laboratorním generátorem, není nutné příliš řešit vnikání rušení. Je však potřeba obvod ochránit před nebezpečími, které mohou nastat při zapojování a ovládání napájení laikem. Navržené ochrany jsou na obrázku 3.14.

Proti napájecímu přepětí, které by mohlo poškodit obvody, zejména operační zesilovače uvnitř přípravku, je zavedena nadproudová ochrana navržená podle literatury [11]. Jedná se o sériově zařazenou tavnou pojistku a zenerovu diodu mezi napájením a zemí (Diody D_1 a D_2). Při přiložení příliš velkého napětí se zenerova dioda otevře a poteče jí velký proud. Tento proud přepálí pojistku a tím se zařízení odpojí od napájení. Zenerovu diodu je třeba vybrat takovou, která tento poruchový proud dokáže přenášet do doby, kdy se přepálí pojistka. Jelikož použité operační zesilovače TL072 mají maximální povolené napájecí napětí $\pm 36\text{ V}$, zenerovy diody jsou voleny s hodnotou 30 V . Uživatel však bude varován

rozsvícením červených LED D_7 a D_8 již při překročení 15 V otevřením zenerových diod D_3 a D_4 . Rezistory R_{42} a R_{43} slouží ke snížení proudu tekoucím diodami D_3 , D_4 , D_7 a D_8 . Tím se zamezí neúmyslnému zničení pojistek během měření.

Tranzistory Q_3 a Q_4 slouží jako ochrana proti přepólování. Pokud by na Drain MOS-FETu Q_4 bylo připojeno záporné napětí, gate bude na vyšším potenciálu, než source tranzistoru v otevřeném stavu. Proto zůstane tranzistor zavřený. Obdobně pracuje i záporná napájecí větev. Diody D_1 a D_2 slouží jako ochrana před příliš vysokým napětím mezi gate a source tranzistoru. Ochrana proti přepólování je nutná, jelikož při špatném zapojení by se již při velmi malém napájecím napětí diody D_5 a D_6 otevřely a spálila by se pojistka. Zapojení je velice podobné, jako proudový omezovač v literatuře [12] s tím rozdílem, že se tranzistory zavírají při přiložení obráceného napětí a ne příliš velkého napětí.



Obr. 3.14: Schéma obvodu napájení

Návrh byl také doplněn o blokovací kondenzátory C_{16} až C_{23} s kapacitou 100 nF. Ty jsou umístěny na přívody napájení operačních zesilovačů.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

V této kapitole je uveden postup návrhu plošného spoje, osazování a ožívování zařízení. Jelikož byly během ožívování změřeny nežádoucí oscilace na výstupu, je v této kapitole popsán také postup odstraňování problému. Součástí kapitoly je také rozbor měření vlastností sestaveného zařízení.

4.1 Návrh plošného spoje

Plošný spoj byl navrhován pomocí softwaru Eagle. Během návrhu bylo potřeba definovat typ a pouzdro všech součástek. Jak bylo již dříve zmíněno, součástky měly být vývodové. Všechny rezistory byly zvoleny s tolerancí 1% a výkonem do 4 W. Jedinou výjimkou jsou rezistory R_{42} a R_{43} , které bylo potřeba zvolit s maximálním výkonem 0,6 W. Kondenzátory použité ve filtrech jsou fóliové. Blokovací kondenzátory blokující napájení operačních zesilovačů byly zvoleny keramické. Kondenzátory C_1 , C_3 , C_4 , C_5 a C_6 byly kvůli vysoké kapacitě zvoleny tantalové. Blokovací kondenzátory napájení C_{24} a C_{25} jsou elektrolytické. Umístění kondenzátorů blokovacích napájení je pokud možno co nejbližší napájecím svorkám operačních zesilovačů. Zenerovými diodami netečou velké proudy, proto byly zvoleny nízkovýkonové. Výjimkou jsou ochranné diody D_5 a D_6 , kterými mohou téct velké proudy při přepětí v napájení. Byly proto zvoleny součástky s maximálním výkonem 5 W. Jelikož je zesílení zesilovacích bloků veliké, byly zpětnovazební trimry zvoleny víceotáčkové, aby malá změna nastavení nezpůsobila velký rozdíl v zesílení a dalo se tak zesílení obou bloků přesně nastavit.

Operační zesilovače jsou uloženy v patičkách aby byly jednoduše vyměnitelné. Protože byly kladeny nároky na jednoduchou servisovatelnost zařízení, všechny mechanické prvky, které nesou fyzickou zátěž jsou připojeny přes odnímatelné spoje, aby bylo možné je v případě potřeby jednoduše vyměnit. Stejně tak jsou řešeny i spoje pro napájení, vstup a výstup. V případě potřeby práce na plošném spoji je tedy možné odpojit všechny externí prvky a pracovat jen s plošným spojem samotným.

Napájecí obvody jsou uloženy na plošném spoji nahoře, aby byly přívodní svorky co nejbližší napájecím vstupům. Patice pro připojení ovládacích prvků byly umístěny dolů - k přední straně krabičky, kde budou ovládací prvky připevněny. Všechny obvody jsou na plošném spoji navrženy po jednotlivých blocích, aby docházelo mezi bloky k co nejmenším parazitním vazbám.

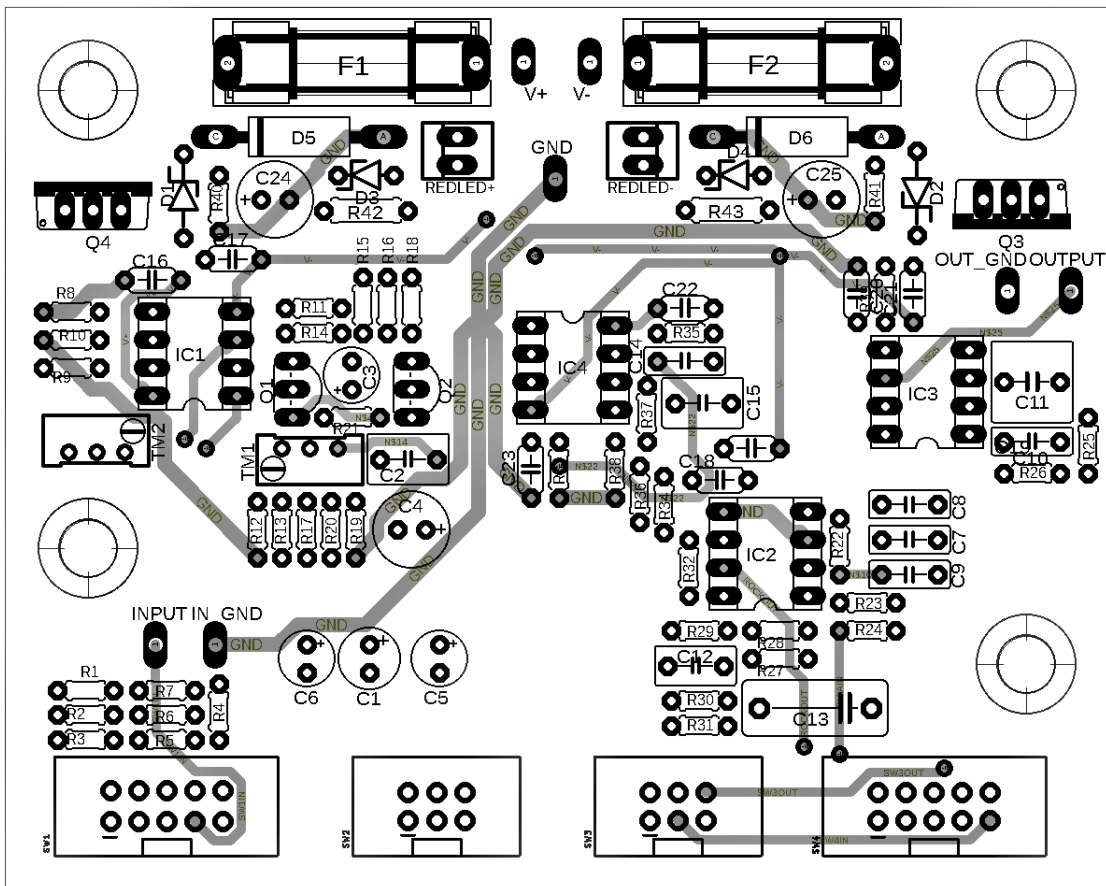
Zemnicí a napájecí cesty jsou vedeny ke všem blokům zvlášť a potkávají se v jednom bodě, aby se zamezilo vzájemnému ovlivňování a rušení mezi jednotlivými bloky. Jedinou výjimkou jsou zesilovací bloky, které mají společné zemění. Tato výjimka byla navržena z důvodu úspory místa. Neměla by však působit problém, jelikož nikdy nebudou v činnosti oba obvody zároveň.

Deska byla navržena oboustranně. Většina spojů je na spodní straně desky. Na horní straně jsou spoje zemění a záporného napájení. Také jsou na horní straně vedeny cesty,

které by křížily spoje na spodní straně. Vedení kladného napájení je na spodní straně, protože bylo potřeba kladné a záporné napájení často křížit.

Plošný spoj je vybaven čtyřmi distančními sloupky, které drží spoj pevně ve své poloze v krabici.

Celkový návrh plošného spoje s umístěním součástek je na obrázku 4.1. Detail na cesty plošného spoje shora a zespod je v příloze na obrázcích C.1 a C.2. V příloze D je také soupiska součástek.



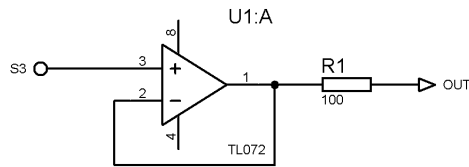
Obr. 4.1: Osazovací pláněk

Rozměry desky - 100 × 80 mm

4.2 Sestrojování zařízení

Během osazování plošného spoje bylo zařízení doplněno o rezistor o hodnotě $100\ \Omega$ sériově zapojený k výstupu zařízení. Ten funguje jako ochrana výstupního zesilovače před zkratováním výstupních vývodů. Při zkratování výstupních vývodů by operační zesilovač dodával příliš vysoký proud a mohlo by dojít k jeho zničení. Sériový rezistor na výstupu

se při zkratu chová jako zátěž a sníží proud protékající výstupem zesilovače. Zapojení je na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Zapojení rezistoru chránícího před zkratováním výstupu zařízení

Jak již bylo dříve uvedeno, byly mechanické prvky navrženy mimo plošný spoj, aby nedocházelo k vylamování kontaktů, či jinému poškození zařízení vlivem mechanického namáhání. Mechanické prvky jsou proto umístěny do stěn krabičky. Pro montáž byla vybrána krabička s přední a zadní stěnou vyjímatelnou a tím přístupnou k vrtání děr pro ovládací prvky a konektory. Spínače byly umístěny na přední stranu, zatímco konektory byly umístěny na stranu zadní. Indikátory přepětí napájecích kontaktů jsou umístěny nad přípojovacími kontakty. Plošný spoj drží v krabičce na čtyřech opěrných sloupcích. Na vrchní stranu krabičky byl přilepen obrázek blokového schématu pro lepší orientaci při ovládání zařízení. Fotografie hotového zařízení jsou na přiloženém CD pod názvy *Přípravek zepředu*, *Přípravek zezadu* a *Přípravek shora*.

Během oživování zařízení bylo zjištěno, že výstup zesilovače s diskrétními prvky je velmi silně zašuměn.

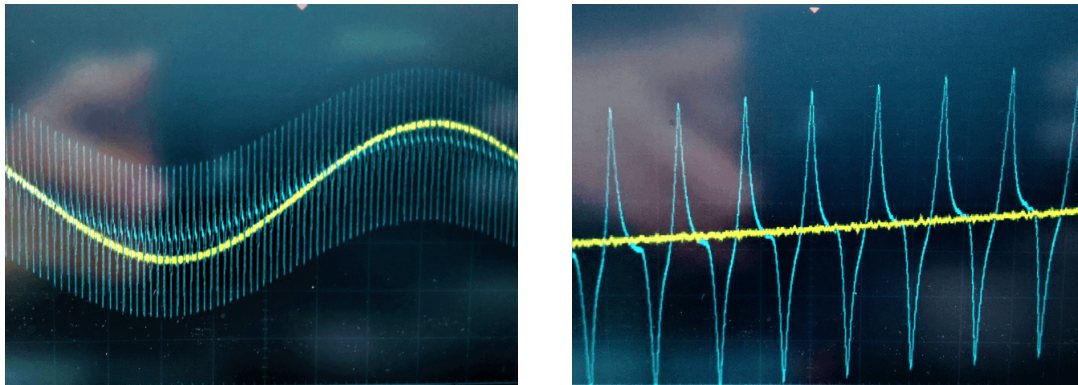
4.3 Šum zesilovače s diskrétními prvky

Velikost šumu je závislá na volbě citlivosti přípravku. Při citlivosti 10 mV není šum na vstupu zřetelný. Nejhorší případ je při nastavené citlivosti 100 mV, kdy je překmit šumu zhruba 740 mV_{peak – peak}. Dalším případem, kdy je šum na výstupu zřetelný je nastavení citlivosti na 1 V. Šum je na výstupu sice zřetelný, oproti předchozímu případu je však zanedbatelný. Při nastavení citlivosti na 10 V není šum při běžném zobrazení viditelný. Při zesílení pomocí OZ nebyl žádný šum na výstupu přítomný. Při dalším zkoumání bylo zjištěno, že je šum silně periodický s frekvencí 60 kHz. Oscilace jsou na obrázcích 4.3a a 4.3b.

Podle literatury [13] bylo nalezeno, že se jedná o rušení impulsními průběhy. Toto rušení nejčastěji vzniká nestabilitami napájecího zdroje. Takové rušení by se dalo řešit přidáním blokováním napájení, nebo použitím stabilizačních integrovaných obvodů.

4.4 Odstraňování oscilací

Prvním krokem bylo hledání rušivého signálu v napájení. Po vyzkoušení třech různých zdrojů, včetně pasivního akumulátorového plovoucího zdroje se výstupní signál však ne-



(a) Výstupní signál s oscilacemi

(b) Detail oscilací

Obr. 4.3: Ukázka oscilací napěťového sledovače při nastavené citlivosti 10 mV

Žlutý průběh - vstupní signál 100 mV, rozlišení 100 mV/d. Zelený průběh - výstupní signál 1 V, rozlišení 1 V/d. Časové rozlišení obr. (a) - 100 μ s/d. Časové rozlišení obr. (b) - 10 μ s/d.

změnil. Rušení z napájení není tedy původcem problémů. Přesto byl návrh doplněn o blokovací kondenzátor. Šum zůstal nezměněn.

To naznačuje, že buď osciluje samotný zesilovač, nebo buffer na výstupu atenuátoru. Aby se zabránilo oscilacím zesilovače, byla dočasně odstraněna zpětná vazba. Výsledný signál se však, kromě změny zesílení, nijak viditelně nezměnil. Zbývají tedy oscilace bufferu, pokud neosciluje jeden ze stupňů zesilovače nezávisle na zpětné vazbě. Po vyřazení atenuátoru ze signálové cesty a přivedení signálu přímo na zesilovač z DP byl výstupní signál bez šumu. Z toho se dá usoudit, že šum vzniká oscilacemi operačního zesilovače. To bylo potvrzeno i pokusem, kdy se měřil výstup bufferu a měnil se typ zesilovače. Při zapojení zesilovače s OZ byl výstup bez oscilací. Jakmile se však připojil zesilovač z diskretních prvků, objevily se oscilace na výstupu bufferu, tedy před vstupem do zesilovače.

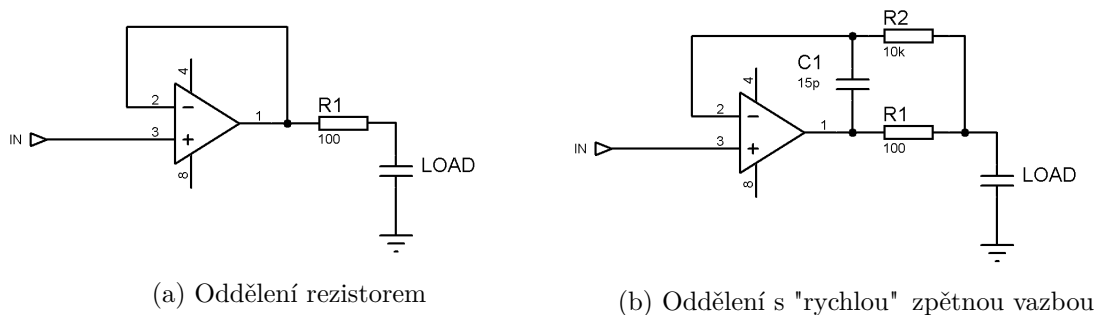
Zesilovač z diskretních prvků je silně kapacitní zátěží. Vstupní reálná impedance navrženého zesilovače je zhruba 1 k Ω . Kapacitní zátěž je tedy převážně určena vstupním kapacitorem C_1 , tedy 22 μ F. Kvůli nízkému vstupnímu odporu se tedy projeví impedance kondenzátoru C_1 mnohem více, než kdyby byl vstupní odpor výrazně větší. Jakmile má napěťový sledovač příliš velkou kapacitní zátěž, dojde k natočení fáze zpětné vazby. Pokud je natočení tak velké, že část signálu ze zpětné vazby dojde na vstup zesilovače s opačnou fází než signál vstupní, zpětná vazba začne fungovat jako kladná zpětná vazba a operační zesilovač začne oscilovat. Z tohoto předpokladu se vycházelo při odstraňování oscilací.

Prvním navrženým řešením tedy bylo zvýšit vstupní impedanci zesilovače. Toho se dá docílit zvýšením hodnot rezistorů R_{11} a R_{12} . Musí se však dbát na to, aby se nezměnil pracovní bod tranzistoru. Také je potřeba zařídit, aby proud protékající děličem zůstal minimálně 10 \times větší, než proud do báze tranzistoru. Těmto podmínkám vyhovují hodnoty $R_{11} = 36$ k Ω , $R_{12} = 8,2$ k Ω . Díky zvýšení vstupní impedance je možné i zmenšení kapacitoru C_1 na hodnotu 2,2 μ F. Změnou vstupní impedance se může mírně změnit i ve-

likost výstupního signálu vlivem impedančního přizpůsobení. Ten je však možné nastavit trimrem RV_1 . Toto řešení se však prokázalo být nedostatečné. Výstupní signál stále velmi silně osciloval.

Dalším navrženým řešením bylo oddělení výstupní svorky bufferu od kapacitní zátěže rezistorem. K tomuto účelu se používá malých hodnot rezistorů do $100\ \Omega$. Jelikož bylo potřeba silného oddělení, byl použit rezistor s právě touto nejvyšší používanou hodnotou $100\ \Omega$. Zapojení je na obrázku 4.4a. Změnu útlumu děliče, vzniklého mezi výstupní impedancí bufferu a vstupní impedancí tranzistoru je možné opět kompenzovat nastavením zesílení pomocí trimru RV_1 . Toto zapojení také nemělo na oscilace vliv. Proto bylo potřeba zaopatřit lepší oddělení vstupní impedance zesilovače od bufferu.

Toho se docílilo zapojením na obrázku 4.4b. Zapojení funguje tak, že se rezistorem oddělí impedanční zátěž. Pomocí kondenzátoru je pak vedena druhá zpětná vazba. Tato zpětná vazba je díky kapacitě kondenzátoru v činnosti až na vyšších frekvencích. Vyšší frekvence jsou tedy zpětnovazebně připojeny přímo, ještě před zatížením kapacitní zátěží. Zesilovač by tedy neměl oscilovat. Toto zapojení bohužel také nezpravitilo problém s oscilacemi. Pravděpodobně proto, že oscilace jsou na relativně nízké frekvenci.



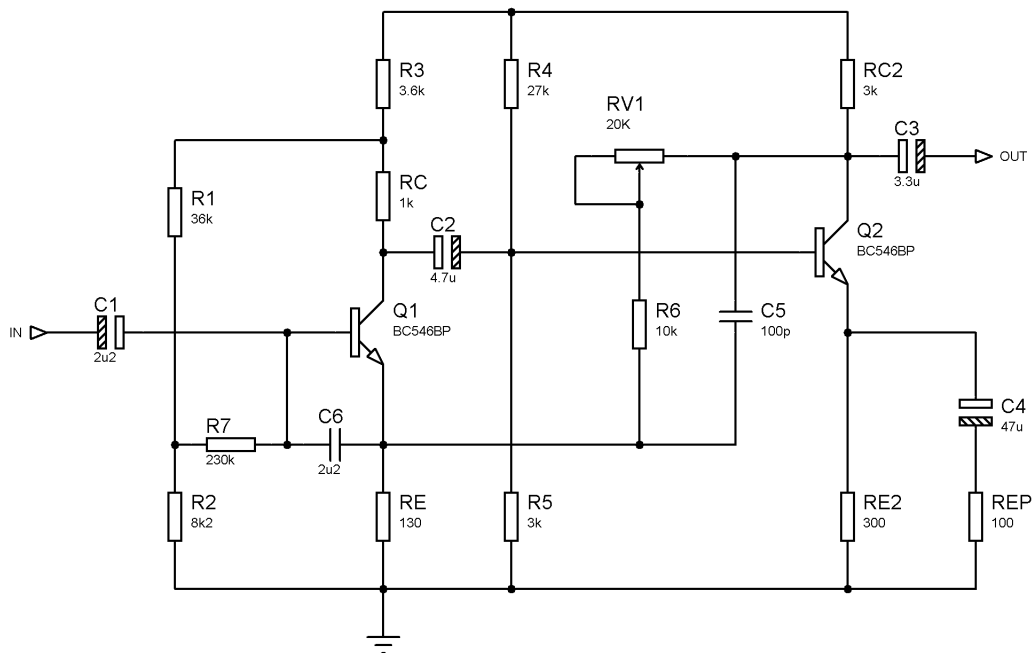
Obr. 4.4: Zapojení oddělující impedanční zátěž od výstupu napěťového sledovače

Dalším možným řešením je nahrazení operačního zesilovače TL072 jiným operačním zesilovačem schopným napájet vysokoimpedanční zátěže. Jelikož je však OZ bufferu v jednom pouzdře se OZ zesilovače s OZ, je třeba vybrat audio zesilovač v pouzdře se stejnými vývody a s podobným napájecím napětím. Takovými zesilovači by mohl být LM833 nebo OPA2134. Oba zesilovače by měly být schopny dodávat bez problémů signál zatížením s impedancí $15\ \text{pF}$. Pomocí dříve zmíněných zapojení oddělující zátěž bychom se mohli zbavit oscilací bufferu. Z důvodu dostupnosti byl vybrán zesilovač LM833. Po zapojení zmíněného zesilovače se překmit oscilací při nastavené citlivosti snížil z $740\ \text{mV}$ na $620\ \text{mV}$. Řešení se dá tedy opět považovat za neúspěšné.

Následujícím možným řešením bylo snížit oscilace zapojením cívky do série s výstupem zesilovače. Jelikož má každý blok, který je možno za zesilovač zapojit vstupní impedancí kolem $10\ \text{k}\Omega$, dá se vypočítat hodnota cívky, která by se dala použít jako filtr typu dolní propust s rezonančním kmitočtem $20\ \text{kHz}$. Těmto kritériím vyhovuje cívka o indukčnosti $80\ \text{mH}$. Takto navržený filtr by snížil zesílení na rezonančním kmitočtu o $3\ \text{dB}$, což je

zanedbatelná ztráta. Na kmitočtu oscilací by však byl útlum pouhých 9 dB. Zapojení bylo ozkoušeno a útlum se podle očekávání prokázal býti nedostatečný, a to i při použití operačního zesilovače LM833, pro další snížení překmitu oscilací. Dostatečného útlumu oscilací se tedy bez závažných zásahů do obvodové struktury nedá docílit. Dostatečného útlumu by se dalo docílit například aktivním filtrem dolní propusti podle Butterwortha. Pro útlum dostatečně veliký, aby byl šum zanedbatelný by byl potřeba filtr minimálně 3. řádu. Návrh filtru je popsán v literatuře [15]. Tento filtr by však vyžadoval dva operační zesilovače. Jelikož by to znamenalo zcela nový návrh plošného spoje, bude třeba odstranit zdroj oscilací.

Jak již bylo řečeno dříve, změnou vstupního děliče se již zvýšení vstupní impedance bloku zesilovače s diskretními prvky nedá docílit, nechceme-li riskovat další nestabilitu zesilovače. Vstupní impedanci je však možné zvýšit uměle pomocí zapojení typu Boot-strap. Podle literatury [14], kde je uvedeno zapojení boot-strap pro operační zesilovač, bylo odvozeno zapojení pro diskretní prvky. Zapojení diskretních prvků se zapojením boot-strap na vstupu je na obrázku 4.5. Toto zapojení zvýší vstupní impedanci zesilovače zhruba na 100 kΩ. Reaktance kondenzátoru C_1 by se měla projevit jen minimálně, tudíž by buffer neměl dále oscilovat. Po vyzkoušení zapojení však oscilace nezmizely.

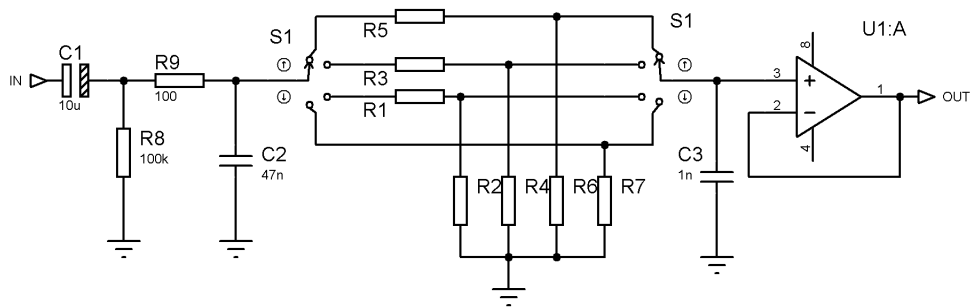


Obr. 4.5: Zapojení zesilovače s diskretními prvky se zvýšenou vstupní impedancí zapojením typu boot-strap

Jelikož je vstupní impedance zesilovače s OZ i zesilovače s DP velmi vysoká, je možné buffer úplně vyřadit z obvodu, a tím zamezit oscilacím bufferu. To tedy bylo provedeno. Bufferu byl odříznut vstup i výstup a výstup přepínače S_1 byl přímo přiveden na vstup přepínače S_2 . Tím tedy došlo k přemostění bufferu. Při zapojení zesílení s DP jsou tedy

obvody zesilovače s diskrétními prvky připojeny přímo k obvodům atenuátoru. Oscilace z výstupu zařízení však nezmizely. Nyní se tedy dají vyloučit oscilace bufferu a příčina se může začít hledat jinde. Tento fakt také vysvětluje odolnost oscilací vůči opatřením zvyšujícím vstupní impedanci zesilovače s DP a zapojením zlepšujícím zatížitelnost bufferu impedanční zátěží.

Při dalším hledání byly naměřeny oscilace na vstupu zařízení, a to i s odpojeným zdrojem harmonických signálů. Přítomnost oscilací na vstupu zařízení vysvětluje vliv vybrané citlivosti na velikosti naměřených oscilací na výstupu. Jelikož se však oscilace dají naměřit na vstupu zařízení i tehdy, když je spínačem S_2 vybráno zesílení pomocí OZ, oscilace musí na vstup zařízení prostupovat přes zemnicí obvody, předpokládáme-li, že oscilace vznikají v zesilovači s diskrétními prvky. Pokud ovšem rušení není přijímáno na vstupním vodiči. Proto byl zesilovač vybaven pasivním filtrem přímo na vstupu zařízení. Tento filtr byl navržen podle literatury [16] a je zobrazen na obrázku 4.6. Je tvořen součástkami na obrázku označenými jako C_1 , R_8 , R_9 a C_2 . Toto opatření však problém taktéž nevyřešilo. Překmit oscilací se snížil, avšak jen minimálně. Výrazně se však snížilo rušení na vstupu zařízení. Jelikož by však dolní propust na vstupu měnila svůj rezonanční kmitočet při měření vstupní impedance a výrazně by zkreslovala výsledky měření, byl z návrhu odstraněn kapacitor na obrázku 4.6 označen jako C_2 .



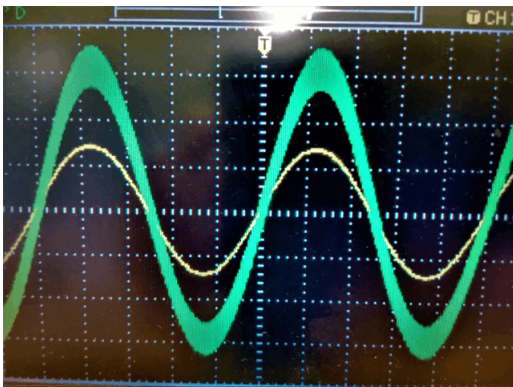
Obr. 4.6: Zapojení vstupního filtru proti rušení indukovanému na přívozech zařízení

Velikost oscilací se však nezměnila na vstupu bufferu, tedy hned za děličem. Proto byl navržen RC člunek i na vstup bufferu. Ten je vyznačen také na obrázku 4.6 a je tvořen kapacitorem na obrázku označeným C_3 . Jako sériový rezistor zde funguje výstupní impedance útlumových členů. Filtr byl navržen tak, aby měl rezonanční kmitočet co možná nejbližší frekvenci 20 kHz pro citlivost 100 mV, kde byly oscilace nejzřetelnější. Ostatní citlivosti mají výstupní impedanci nižší, takže se bude rezonanční kmitočet posouvat výše a neomezí měřené pásmo. Tento filtr snížil překmit oscilací, avšak stále jsou oscilace na výstupu zařízení příliš velké pro měření v laboratoři. Stále ale není jasné, kde oscilace vznikají.

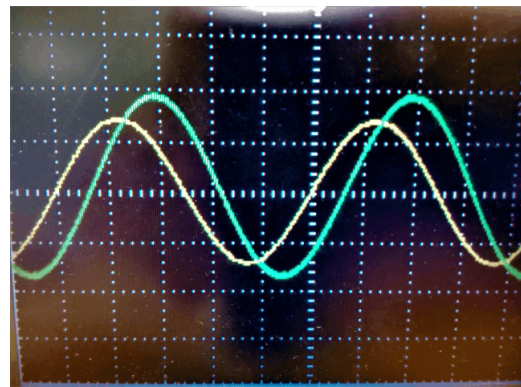
Jak bylo zmíněno dříve, zesilovač s diskrétními prvky a zesilovač s OZ mají společné země. Je možné, že při odpojení zesilovače s OZ dojde k zesílení šumu na vstupu nezapojeného zesilovače a ten začne oscilovat. Parazitní odpor zemnění by mohl mít za výsledek

napětové kolísání, které by mohl zesilovač s DP zesilovat. To by vystvětlovalo i absenci oscilací při zesílení operačním zesilovačem. Zesilovač s OZ je zapojen a nemůže tedy oscilovat, zesilovač s DP je odpojen a nemůže tedy zesilovat kmity. Proto byly země obou zesilovačů odděleny a drátkem připojeny ke společnému bodu. Oscilace však na výstupu byly stále. Oscilace tedy nejsou způsobeny oscilacemi nezapojeného operačního zesilovače přenášenými přes zemnicí vedení.

Při zpětném hledání příčiny oscilací byl opět proveden pokus o přemostění bufferu. Tentokrát však nebyl buffer odpojen a přemostěn na plošném spoji, ale byl vytažen celý operační zesilovač z patice. Do patice byl zaveden drátek, který spojoval výstup útlumových článků se vstupem zesilovače s diskretními prvky. Fotografie zapojení je na fotografii na přiloženém CD pod názvem *Detail drátkem přemostěného bufferu*. Oscilace z výstupu zmizely. Fotografie výstupního napětí s operačním zesilovačem a s odstraněným operačním zesilovačem jsou na obrázcích 4.7a a 4.7b.



(a) Signál s IC1 v patici



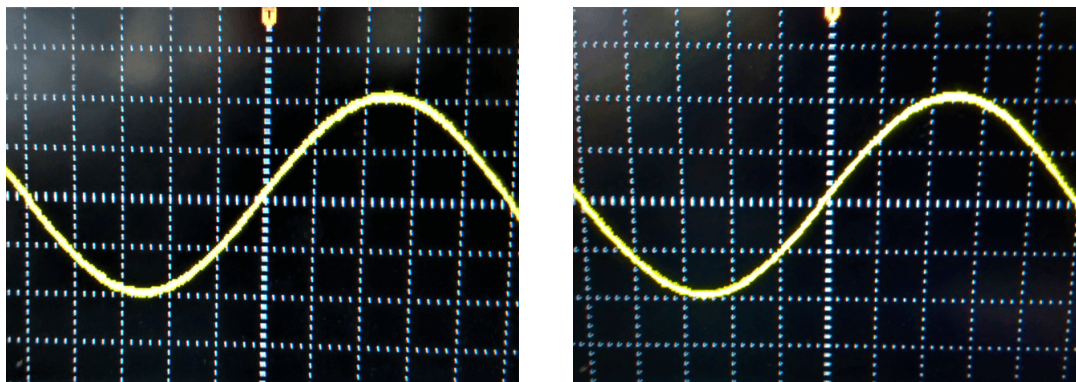
(b) Signál bez IC1 v patici

Obr. 4.7: Ukázka vlivu odstranění operačního zesilovače na oscilace zesilovače s DP

Žlutý průběh - vstupní signál 100 mV, rozlišení 100 mV/d. Zelený průběh - výstupní signál 1 V, rozlišení 1 V/d. Časové rozlišení - 10 μ s/d.

Zesilovač tedy nemá na výstupu oscilace, pokud není v činnosti buffer a zesilovač s operačním zesilovačem. Jelikož byla mnohonásobně zvýšena vstupní reálná impedance zesilovače s diskretními prvky a jalová impedance byla snížena, buffer by neměl oscilovat. Problém tedy musí být v zesilovači s OZ. Po navrácení integrovaného obvodu zpět do patice byl změřen výstup nezapojeného zesilovače s OZ. Na výstupu by neměl být žádný signál, jelikož je zesilovač přes rezistor R_8 připojen k zemi. Na výstupu zesilovače se však nacházely oscilace, které přecházely až do saturace. Odpojený zesilovač nejspíš po odpojení zareaguje na jakýkoli podnět na vstupu, který mnohonásobně zesílí. Parazitní kapacitou mezi cestami vstupu a výstupu zesilovače se zesílený signál dostane zpět na vstup, kde se opět zesílí a operační zesilovač začne oscilovat. Oscilace se dostanou i do bufferu, se kterým rozkmitaný operační zesilovač sdílí pouzdro, a z bufferu na vstup zesilovače s Diskretními prvky.

Řešení se nabízí více. Nejjednodušší z nich je však přemostění vstupní části spínače S_2 , takže oba zesilovací obvody budou vždy připojeny. Připojený obvod nebude oscilovat, neboť na jeho vstupu bude signál. Pomocí druhé části spínače S_2 lze vybrat, který zesilovač je připojen k následujícím blokům zařízení. Celkové zapojení je znázorněno v příloze na obrázku B.3. Průběhy výstupních signálů obou zesilovačů jsou na obrázcích 4.8a a 4.8b.



(a) Výstup zesilovače s OZ

(b) Výstup zesilovače s DP

Obr. 4.8: Ukázka vlivu odstranění operačního zesilovače na oscilace zesilovače s DP

Žlutý průběh - výstupní signál 100 mV, rozlišení 500 mV/d. Časové rozlišení - 100 μ s/d.

4.5 Měření vlastností přípravku

Měření vlastností probíhalo formou měření laboratorní úlohy. K té bylo potřeba nejprve vytvořit zadání. Úkoly v laboratorní úloze jsou dané zadáním z předchozích let. Proto byl jen mírně pozměněn postup měření některých úkolů tak, aby lépe vyhovoval měření na navrženém zařízení. Předmětem měření je měření skutečné citlivosti obou zesilovačů, měření kmitočtových charakteristik všech pevných korekcí, sestavení modulových kmitočtových charakteristik korekcí a odečtení lomových frekvencí korekce RIAA, určení vstupní impedance přípravku, určení přebuditelnosti obou zesilovačů a měření harmonického zkreslení obou zesilovačů. Laboratorní úloha byla rozšířena o měření frekvenčních charakteristik obou zesilovačů. Zadání laboratorní úlohy je na přiloženém CD pod názvem *BNFE Úloha 1 Vilém Friml*.

Výsledky měření jsou na přiloženém CD pod názvem *BNFE Úloha 1 Vilém Friml - Výsledky* ve formě vyplněného protokolu laboratorní úlohy. V příloze jsou změřené modulové charakteristiky zesilovačů a frekvenčních korekcí na obrázcích E.1 a E.2.

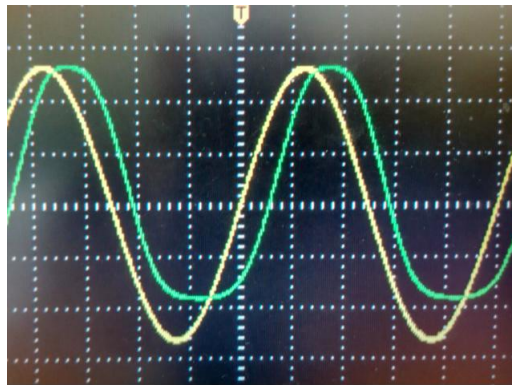
Všechny naměřené hodnoty odpovídají simulacím. Jedinou výjimkou je měření vstupní impedance zařízení. Naměřená vstupní impedance pro zesílení operačním zesilovačem je 35 k Ω místo navrhovaných 51 k Ω . To je způsobeno zavedeným filtrem na vstup zařízení znázorněném na obrázku 4.6. Rezistor na obrázku označený jako R_8 je totiž paralelní

zátěží k vstupní impedanci útlumových článků. Očekávaná impedance zařízení se zavedeným filtrem se dá vypočítat jako paralelní kombinace vstupní impedance attenuátoru a rezistoru R_8 .

$$R_{vst} = \frac{R_{att} \times R_8}{R_{att} + R_8} = \frac{51k \times 100k}{51k + 100k} = 33,77 k\Omega$$

Tato vypočtená hodnota již odpovídá naměřeným výsledkům.

Další zajímavou změřenou vlastností zesilovače je typ zkreslení zesilovače s diskrétními prvky při přebuzení vstupu. Jedná se totiž o zkreslení typu *Soft clipping*. To je způsobenou nelinearitou přenosové charakteristiky zesilovače s tranzistorem v třídě A. Dá se pozorovat na dolní půlvlně, kde se vlivem vstupního napětí na bázi tranzistoru pohne pracovní bod pod lineární část přenosové charakteristiky. Zkreslení se projevuje jako postupné zaoblování, narozdíl od saturačního zkreslení operačních zesilovačů, kde je průběh velmi ostrý. Dalším projevem je vznik sudých harmonických složek signálu, což vysvětluje poměrově vyšší hodnoty zkreslení na dvojnásobku frekvence vstupního signálu u diskrétních prvků oproti zkreslení operačního zesilovače. Průběh zkresleného signálu pomocí diskrétních prvků je na obrázku 4.9.



Obr. 4.9: Zkreslení zesilovače s diskrétními prvky

Žlutý průběh - vstupní signál 44 mV, rozlišení 25 mV/d. Zelený průběh - výstupní signál 4 V, rozlišení 2 V/d. Časové rozlišení - 10 μ s/d.

Na přiloženém CD je fotografie měřené laboratorní úlohy pod názvem *Měření laboratorní úlohy* a detail na vnitřek konstruovaného zařízení pod názvem *Přípravek bez krytu*.

5 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout blokovou a obvodovou strukturu nízkofrekvenčního korekčního zesilovače pro laboratorní výuku. V první kapitole byly rozebrány nároky na navrhovaný zesilovač a byl uvážen postup. Bylo rozhodnuto, že návrh bude probíhat po jednotlivých blocích, které se později spojí. Po uvážení všech nároků byla navržena bloková struktura zesilovače zobrazená na obrázku 3.1.

Další kapitola se zabývala teoretickými okruhy, které je nezbytné znát pro správnou tvorbu návrhů zapojení zesilovačů a frekvenčních korekcí. Pořadí podkapitol teoretického úvodu bylo seřazeno podle pořadí návrhu.

V kapitole Návrh zařízení byl rozebrán postup návrhu obvodové struktury jednotlivých bloků. Atenuátor byl navržen pomocí L útlumových členů řazených paralelně a připojených na napěťový sledovač, který je oddělil od dalších bloků. Bylo rozhodnuto, že zesilovač s OZ bude operační zesilovač v neinvertujícím zapojení, ke kterému byly přidány další prvky zlepšující jeho vlastnosti a kompatibilitu s následujícími bloky. Zesilovač s diskrétními prvky byl navržen jako dvoustupňový zesilovač třídy A se zpětnou vazbou. Výstupní zesilovač je jednoduchý napěťový sledovač. Jeho jediným úkolem je totiž oddělení předchozích bloků od výstupu.

Mezi zesilovače a výstupní buffer byly vloženy paralelně zapojené přepínatelné korekce. Korekce RIAA a fyziologická korekce byly navrženy pomocí již známých obvodů převzatých z literatury a upravených podle zadaných požadavků. Bylo však potřeba dosáhnout kompatibility s předchozím a následujícím blokem. K tomu byly využito operačních zesilovačů.

Další korekcí bylo zdůraznění řeči. To bylo navrženo jako jednoduchá aktivní pásmová propust. Poslední navrženou korekcí je žánrový preset pro rock. Žánrové presety nejsou pevně definovány, proto byl jako předloha použit preset aplikace NRG Player. Korekce je navržena jako modifikovaná pásmová zadrž.

Návrh byl rozšířen o obvody napájení a ochrany proti přepólování a přepětí napájecího napětí. Do návrhu byla také přidána indikace zvýšeného napětí napájecích kontaktů, aby bylo sníženo riziko přiložení příliš velkého napájecího napětí, což by vedlo ke zničení pojistek v přístroji.

V praktické části práce byl navržen plošný spoj zařízení. Ovládací prvky a konektory byly umístěny mimo plošný spoj pro zvýšení životnosti zesilovače. Podle návrhu byl plošný spoj vytvořen a osazen. Plošný spoj byl umístěn do krabičky s popisky příslušných ovládacích prvků a kontaktů. Krabička byla také vybavena blokovým schématem pro lepší orientaci při ovládání přípravku.

Během oživování bylo zjištěno, že výstup zesilovače s diskrétními prvky velmi silně osciluje. Řešení tohoto problému se věnuje kapitola 4.4. Původem oscilací je zesilovač s OZ, který začne oscilovat při odpojení vstupu spínačem S_2 . Oscilace zesilovače ovlivňují přes parazitní kapacity vstup bufferu. Ten je připojen na vstup zesilovače s diskrétními prvky a proto se oscilace objeví na jeho výstupu. Problému se dá předejít přemostěním

vstupní části spínače S_2 , takže jsou v činnosti vždy oba zesilovače. Zesilovač s operačním zesilovačem tedy nemá nikdy odpojený vstup, takže nevznikají oscilace.

Měření parametrů zesilovače probíhalo stejnou formou, jakou bude probíhat měření laboratorní úlohy předmětu BNFE na sestrojeném zařízení. Pro tu bylo nejprve vytvořeno zadání, které je na příloženém CD pod názvem *BNFE Úloha 1 Vilém Friml*. Všechny naměřené hodnoty odpovídají simulacím. Oba zesilovače mají dostatečné zesílení a jejich frekvenční charakteristika má v celém akustickém pásmu rovnou charakteristiku s odchylkou menší, než 3 dB. Naměřená modulová frekvenční charakteristika korekcí odpovídá simulacím. Nárok na nulové zesílení na 1 kHz je u všech frekvenčních korekcí splněn. Modulová frekvenční charakteristika zesilovačů a korekcí jsou v příloze E. Vstupní impedance zařízení je snížena vlivem zavedeného filtru na vstup zesilovače. Ten je však na vstupu nezbytný kvůli filtrování šumu indukovaném na přívodní vodiče a filtrování stejnosměrného napětí ze zdroje. Stále je však vstupní impedance zařízení v řádech desítek $k\Omega$, takže vyhovuje zadání.

Po přemostění vstupní části spínače S_2 zesilovač funguje podle simulací a proto je možné jej použít pro laboratorní měření předmětu BNFE.

LITERATURA

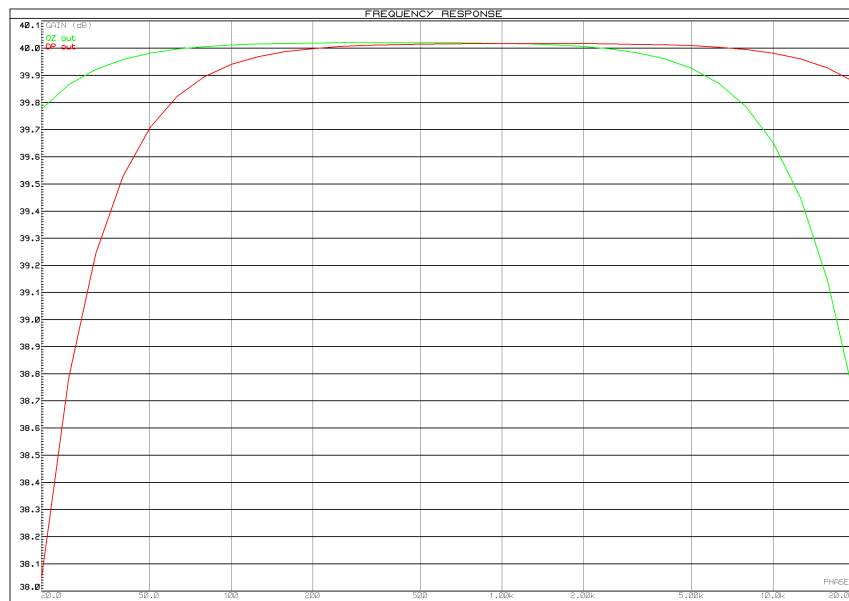
- [1] MYSLÍK, J. *Elektrické obvody - řešené příklady: příručka pro praxi a učebnice pro studenty středních a vysokých škol*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-33-3.
- [2] DOSTÁL, J. *Operační zesilovače*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-049-0.
- [3] PUNČOCHÁŘ, J. *Operační zesilovače v elektronice*. 4. dopl. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-37-6.
- [4] SUCHÁNEK, V. *Dioda, tranzistor a tyristor názorně: programovaný kurs*. 3., nezm. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [5] LENK, J. D. *Handbook of modern solid-state amplifiers*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1974. ISBN 978-0133803945.
- [6] KOTISA, Z. *NF zesilovače a jejich amatérská stavba*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 80-7300-030-X.
- [7] WILLIAMS, A. B. *Electronic filter design handbook: LC, active, and digital filters*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [8] VIZMULLER, P. *RF design guide: systems, circuits, and equations*. Boston: Artech House, c1995. ISBN 0-89006-754-6.
- [9] ELLIOTT, R.; CROWLEY, R., *Hi-Fi Phono Preamp (RIAA Equalisation*. sound.whsites.net [11.11.2017]
- [10] WIRSUM, S. *Abeceda nf techniky*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-26-0.
- [11] Hughes, F.W. *OP-AMP Handbook*. 2nd. edition. New Jersey: Prentice hall 1986. ISBN 978-0136373155.
- [12] Lenk, J.D. *Circuit troubleshooting handbook* New York: McGraw-Hill, 1998. ISBN 0070381852.
- [13] KŮS, V. *Nízkofrekvenční rušení*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-976-1.
- [14] BELZA, J. *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-060-1.
- [15] SCHAUMANN, R.,GHAUSI, M.S. a LAKER, K.R. *Design of analog filters: passive, active RC, and switched capacitor*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, c1990. ISBN 0132002884.

- [16] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. *Kmitočtové filtry*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-023-7.

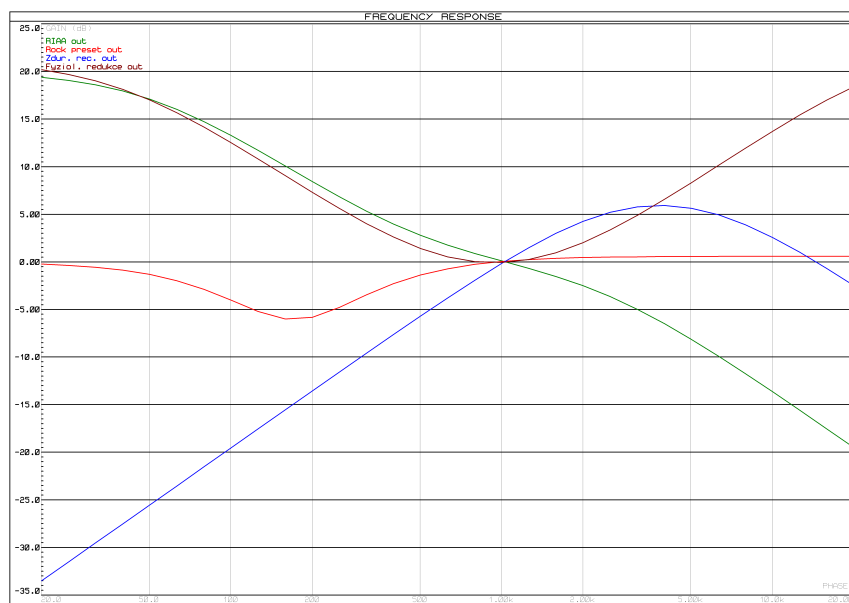
SEZNAM PŘÍLOH

A Simulace	50
B Obvodová struktura	51
C Plošný spoj	54
D Soupiska součástek	56
D.1 Pasivní součástky	56
D.1.1 Rezistory	56
D.1.2 Kondenzátory	57
D.2 Polovodičové součástky	58
D.3 Ostatní součástky	59
E Měření	60
F Obsah příloženého CD	61

A SIMULACE

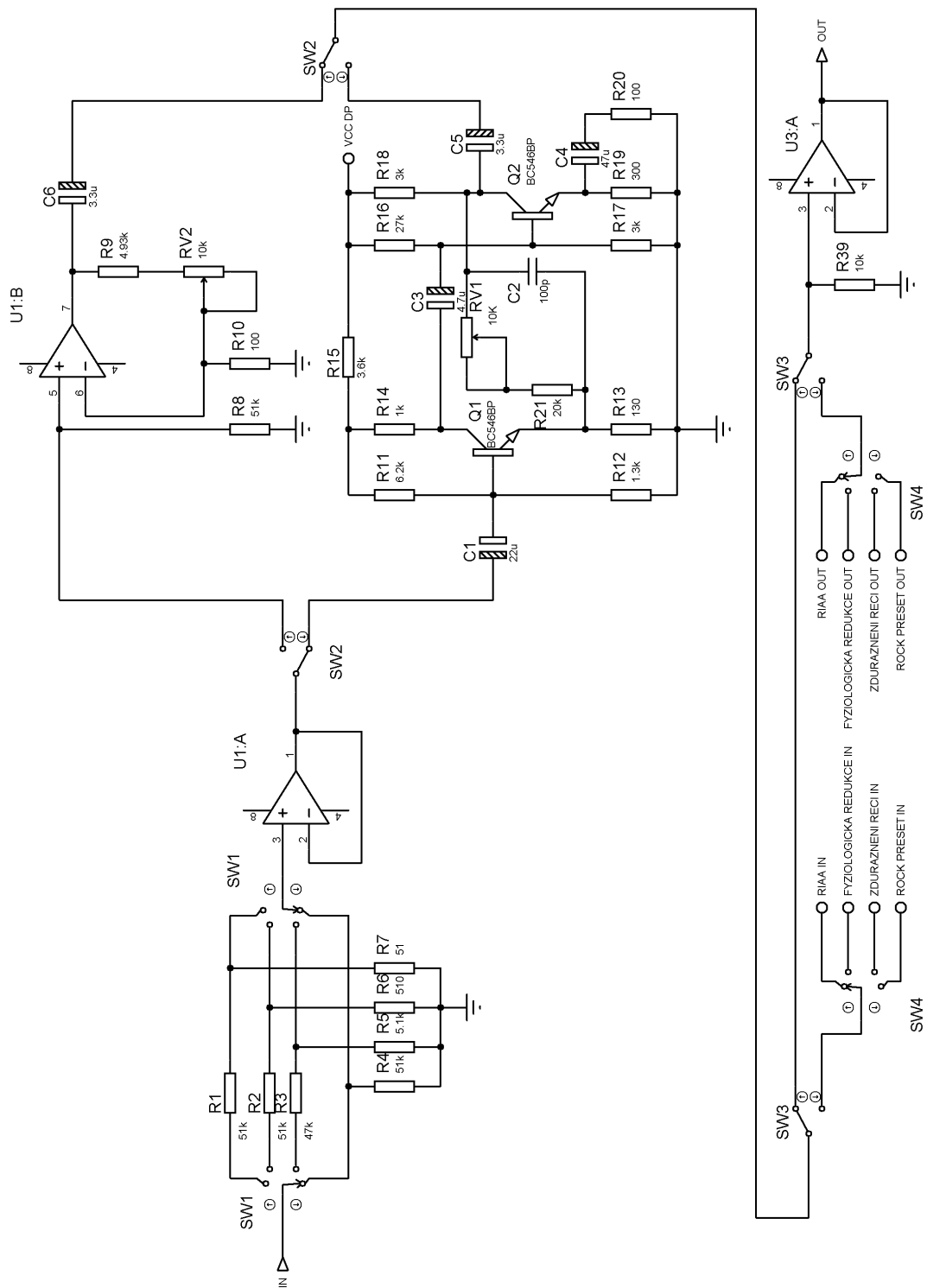


Obr. A.1: Simulace modulové kmitočtové charakteristiky zapojení zesilovače s operačním zesilovačem a zesilovače s diskretními prvky

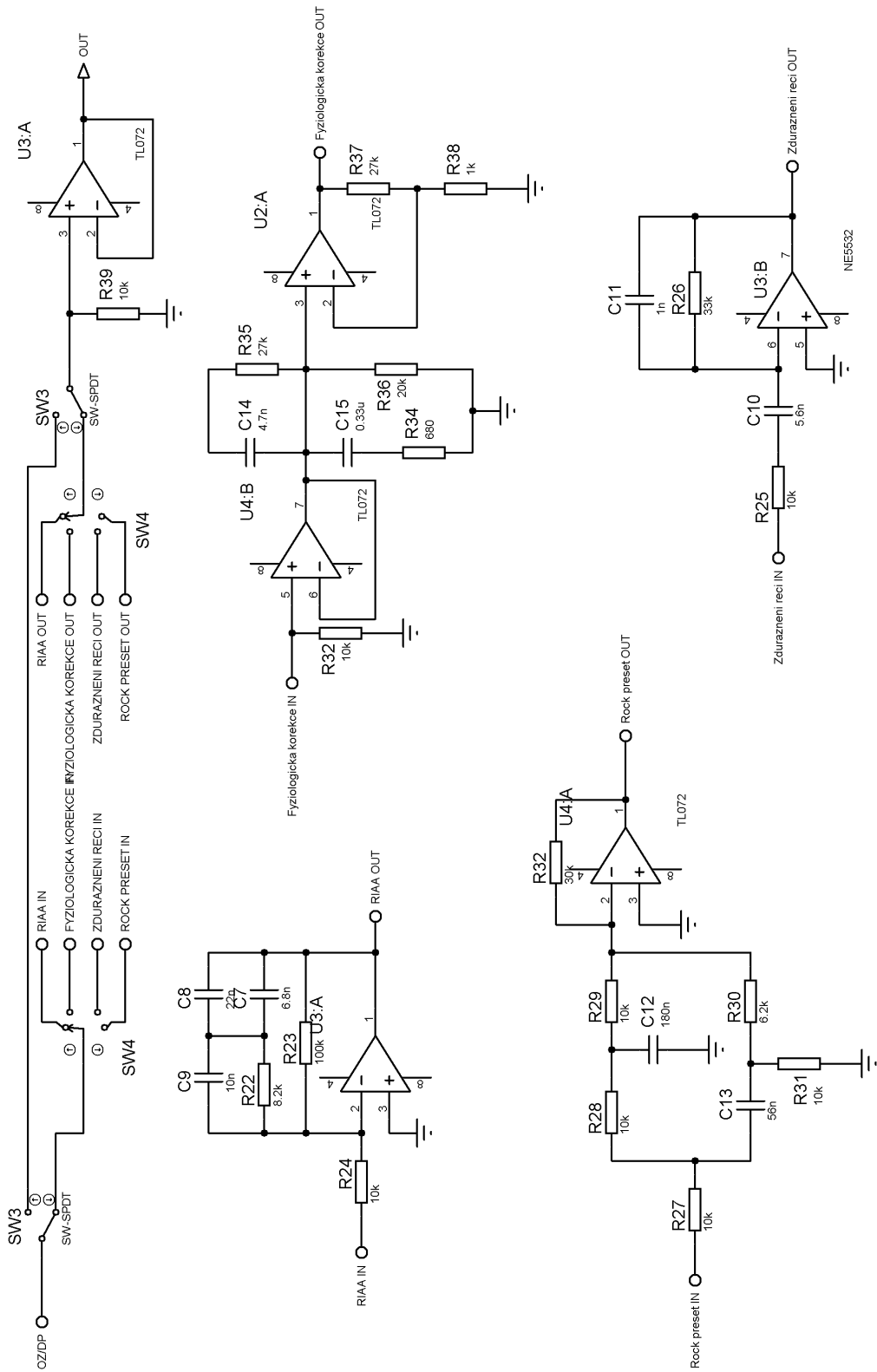


Obr. A.2: Simulace modulové kmitočtové charakteristiky všech navržených korekcí

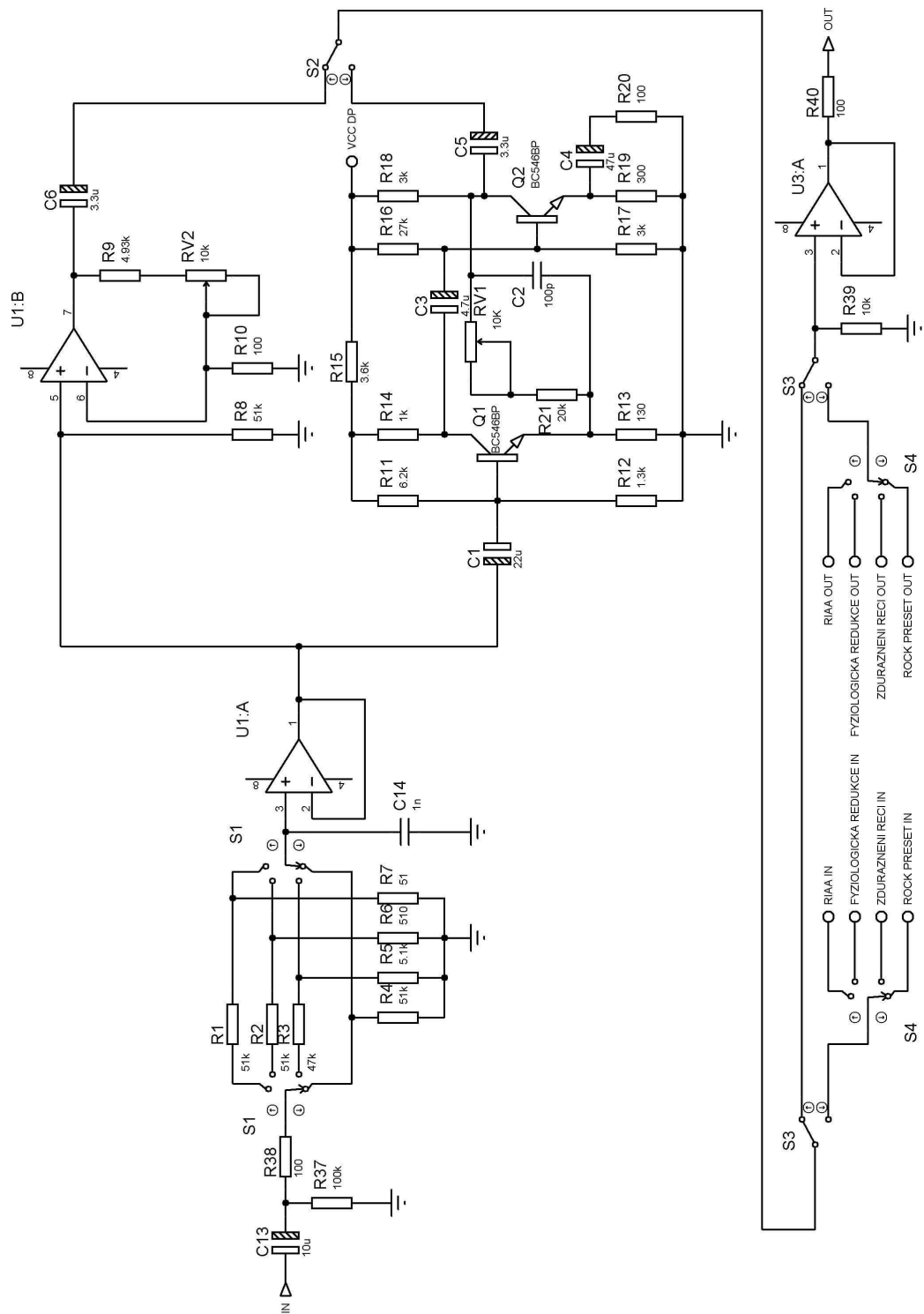
B OBVODOVÁ STRUKTURA



Obr. B.1: Celkové schéma zapojení zesilovačů

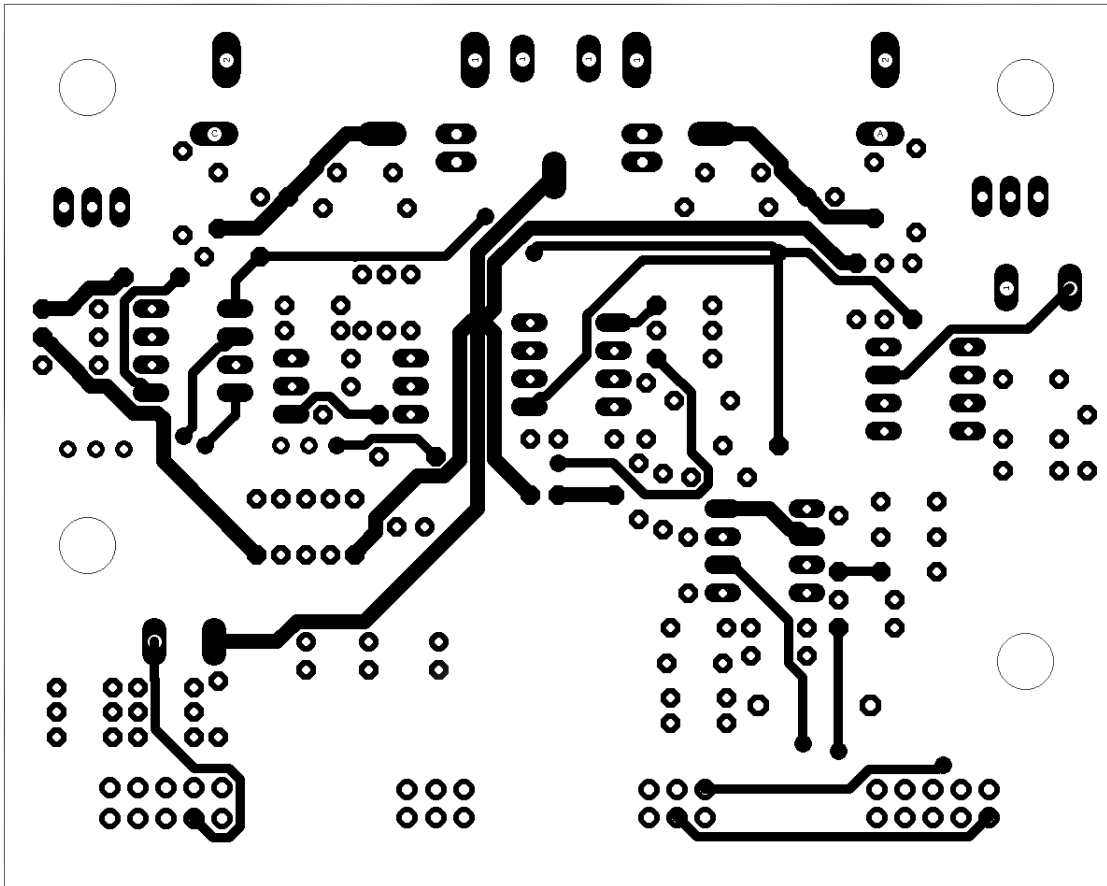


Obr. B.2: Celkové schéma zapojení korekcí



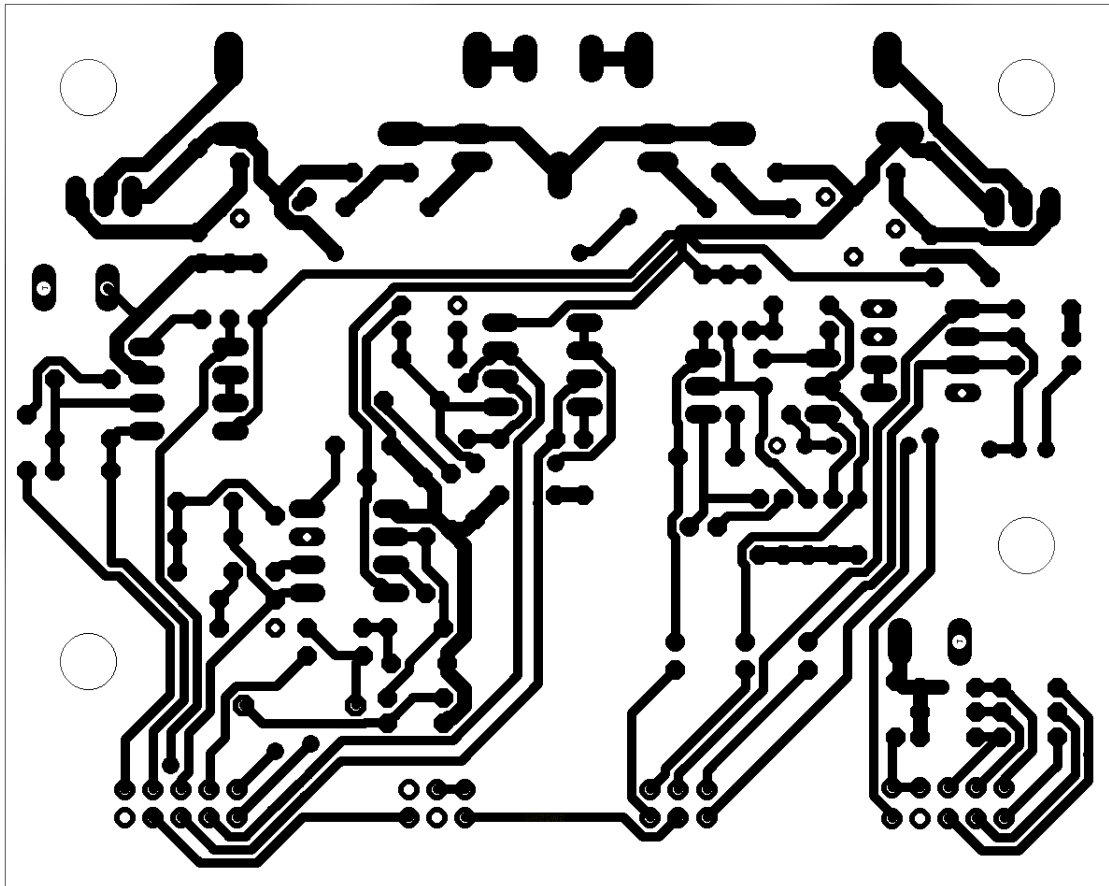
Obr. B.3: Zapojení s odstraněnými oscilacemi

C PLOŠNÝ SPOJ



Obr. C.1: Navržený plošný spoj - pohled shora

Rozměry desky - 100 × 80 mm



Obr. C.2: Navržený plošný spoj - pohled zespodu

Rozměry desky - 100 × 80 mm

D SOUPISKA SOUČÁSTEK

D.1 Pasivní součástky

D.1.1 Rezistory

Metalizované rezistory s tolerancemi $\pm 1\%$. Všechny rezistory jsou určeny pro maximální zatížení 0,4 W s výjimkou rezistorů R_{42} a R_{43} , které jsou určeny pro zatížení do 0,6 W.

Tab. D.1: Soupiska rezistorů

Rezistor	Hodnota	Pouzdro	Rezistor	Hodnota	Pouzdro
R_1	51 k Ω	0204	R_{23}	100 k Ω	0204
R_2	51 k Ω	0204	R_{24}	10 k Ω	0204
R_3	47 k Ω	0204	R_{25}	10 k Ω	0204
R_4	51 k Ω	0204	R_{26}	33 k Ω	0204
R_5	5,1 k Ω	0204	R_{27}	10 k Ω	0204
R_6	510 Ω	0204	R_{28}	10 k Ω	0204
R_7	51 Ω	0204	R_{29}	10 k Ω	0204
R_8	51 k Ω	0204	R_{30}	6,2 k Ω	0204
R_9	5 k Ω	0204	R_{31}	10 k Ω	0204
R_{10}	100 Ω	0204	R_{32}	30 k Ω	0204
R_{11}	6,2 k Ω	0204	R_{33}	10 k Ω	0204
R_{12}	1,3 k Ω	0204	R_{34}	680 Ω	0204
R_{13}	130 Ω	0204	R_{34}	27 k Ω	0204
R_{14}	1 k Ω	0204	R_{36}	20 k Ω	0204
R_{15}	3,6 k Ω	0204	R_{37}	27 k Ω	0204
R_{16}	27 k Ω	0204	R_{38}	1 k Ω	0204
R_{17}	3 k Ω	0204	R_{39}	10 k Ω	0204
R_{18}	3 k Ω	0204	R_{40}	100 k Ω	0204
R_{19}	300 Ω	0204	R_{41}	100 k Ω	0204
R_{20}	100 Ω	0204	R_{42}	620 Ω	0207
R_{21}	20 k Ω	0204	R_{43}	620 Ω	0207
R_{22}	8,2 k Ω	0204			

D.1.2 Kondenzátory

Tab. D.2: Soupiska kondenzátorů

Kondenzátor	Hodnota	Rozteč vývodů	Typ
C_1	22 μF	2,5 mm	Tantalový
C_2	100 pF	5 mm	Fóliový
C_3	4,7 μF	2,5 mm	Tantalový
C_4	47 μF	2,5 mm	Tantalový
C_5	3,3 μF	2,5 mm	Tantalový
C_6	3,3 μF	2,5 mm	Tantalový
C_7	6,8 nF	5 mm	Fóliový
C_8	22 nF	5 mm	Fóliový
C_9	10 nF	5 mm	Fóliový
C_{10}	5,6 nF	5 mm	Fóliový
C_{11}	1 nF	5 mm	Fóliový
C_{12}	180 nF	5 mm	Fóliový
C_{13}	56 nF	10 mm	Fóliový
C_{14}	4,7 nF	5 mm	Fóliový
C_{15}	330 nF	5 mm	Fóliový
C_{16}	100 nF	5,08 mm	Keramický
C_{17}	100 nF	5,08 mm	Keramický
C_{18}	100 nF	5,08 mm	Keramický
C_{19}	100 nF	5,08 mm	Keramický
C_{20}	100 nF	5,08 mm	Keramický
C_{21}	100 nF	5,08 mm	Keramický
C_{22}	100 nF	5,08 mm	Keramický
C_{23}	100 nF	5,08 mm	Keramický
C_{24}	100 μF	2,5 mm	Elektrolytický
C_{25}	100 μF	2,5 mm	Elektrolytický

D.2 Polovodičové součástky

Tab. D.3: Soupiska tranzistorů

Tranzistor	Označení	pouzdro
Q_1	BC546B	TO92
Q_2	BC546B	TO92
Q_3	IRLZ44N	TO220
Q_4	IRF4905	TO220

Tab. D.4: Soupiska operačních zesilovačů

Operační zesilovač	Označení	pouzdro
IC_1	TL072	DIP8
IC_2	TL072	DIP8
IC_3	TL072	DIP8
IC_4	TL072	DIP8

Tab. D.5: Soupiska diod

Dioda	Označení	Typ
D_1	BZX85V013	Zenerova
D_2	BZX85V013	Zenerova
D_3	BZX85V015	Zenerova
D_4	BZX85V015	Zenerova
D_5	1N5363B	Zenerova
D_6	1N5363B	Zenerova
D_7	BL-B5141-L	LED
D_8	BL-B5141-L	LED

D.3 Ostatní součástky

Tab. D.6: Soupiska spínačů

Spínač	Označení	Typ
S_1	P-DS3	Otočný
S_2	P-B073B	Páčkový
S_3	P-B073B	Páčkový
S_4	P-DS3	Otočný

Tab. D.7: Soupiska konektorů

Typ	Označení	množství
Konektor na ploché kabely	PFL10	2
Konektor na ploché kabely	PFL06	2
Konektor se zámkem	PFH02-02P	2
Faston na kabel	FZK	7
Konektor na ploché kabely do plošného spoje	MLW10GT	2
Konektor na ploché kabely do plošného spoje	MLW06G	2
Konektor se zámkem do plošného spoje	PSH02-02PG	2
Faston do plošného spoje	FVP	7
Koaxiální BNC konektor	BNC-Z PAN 50R LC	2
Panelová zdířka 4mm Černá	24.246.2	1
Panelová zdířka 4mm Červená	24.246.1	1
Panelová zdířka 4mm Modrá	24.246.3	1

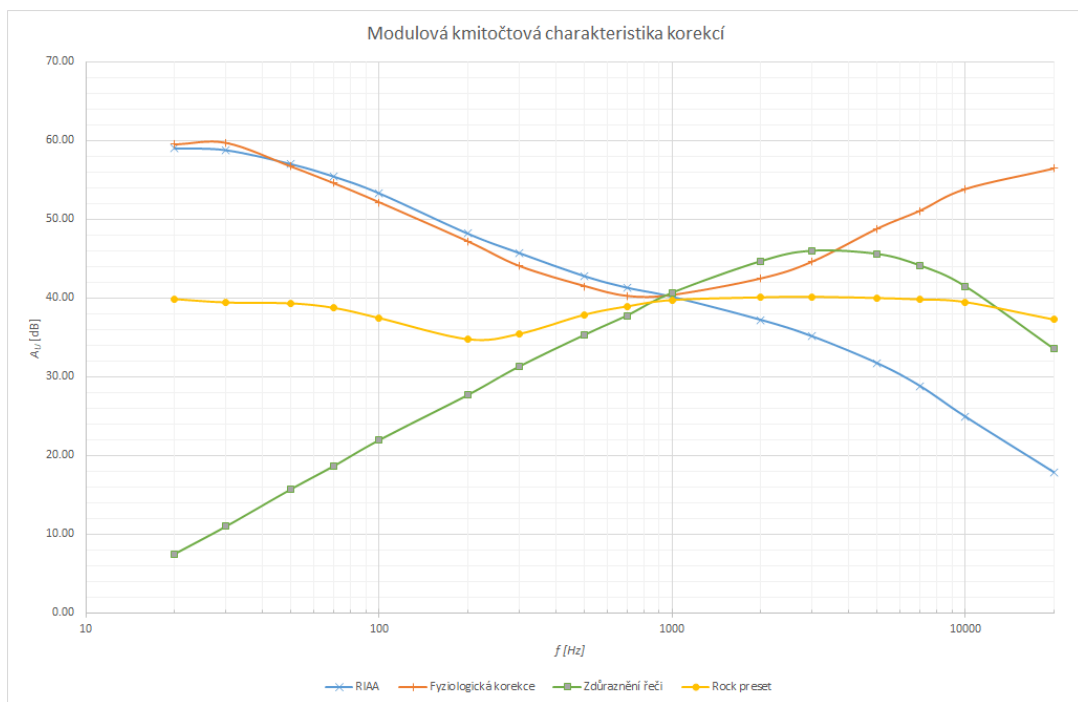
Tab. D.8: Soupiska ostatních součástek

Součástka	Označení	Množství
Patice DIL8	SOKL8	4
Trimr 10 k Ω Lineární Víceotáčkový	M64W103KB40	2
Patice pro pojistku	DPS SCHURTER 0031.8201	2
Trubičková pojistka 500 mA	T 500mA 5x20	2
Objímka pro LED 3mm	OSM6-C	2
Přístrojový knoflík	P-SG21-S	2
Distanční sloupek	DA4M2X15	4

E MĚŘENÍ



Obr. E.1: Změřená modulová frekvenční charakteristika zesilovačů



Obr. E.2: Změřená modulová frekvenční charakteristika frekvenčních korekcí

F OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Tab. F.1: Obsah přiloženého CD

Název	Typ souboru
BNFE Úloha 1 Vilém Friml - Výsledky	Microsoft Word dokument
BNFE Úloha 1 Vilém Friml	Microsoft Word dokument
Detail drátkem přemostěného bufferu	JPG File
Měření laboratorní úlohy	JPG File
Přípravek bez krytu	JPG File
Přípravek shora	JPG File
Přípravek zepředu	JPG File
Přípravek zezadu	JPG File