



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

ZESILOVAČ S OCHRANOU REPRODUKTORU

AMPLIFIER WITH SPEAKER PROTECTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Libor Příbyl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Kubánek, Ph.D.

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Libor Příbyl

ID: 155221

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Zesilovač s ochranou reproduktoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte měření závislosti výchylky membrány širokopásmového 5" reproduktoru v bezodrazovém měřicím boxu na kmitočtu při různých amplitudách budicího napětí. Na základě změřených charakteristik navrhnete obvody chránící tento reproduktor před poškozením vlivem velké výchylky membrány na nízkých kmitočtech. Součástí návrhu bude i koncový zesilovač. Proveďte počítačovou simulaci obvodů, zkonstruujte je a změřte jejich parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SMETANA, Ctírad. Praktická elektroakustika. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981, 692 s.

[2] MERHAUT, Josef a kol. Příručka elektroakustiky. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1964. 608 s. ISBN 0455064

[3] COLLOMS, Martin a Paul DARLINGTON. High performance loudspeakers. 6th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005, xxv, 532 p. ISBN 04-700-9430-3.

[4] TOMAN, Kamil. Reprodukory a reprosoustavy, 1 díl. Karviná: DEXON, 2001. 211 s.

[5] ŠKVOR, Zdeněk. Elektroakustika – měření, 3. vydání. Praha: ČVUT, 1995. 214 s.

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 1.6.2016

Vedoucí práce: Ing. David Kubánek, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. 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

Předkládaná práce pojednává o problematice poškození reproduktoru vlivem velké výchylky membrány na nízkých kmitočtech. Základním zaměřením je návrh a konstrukce obvodu pro ochranu reproduktoru před tímto druhem poškození a následné změření jeho parametrů. Součástí práce jsou teoretické předpoklady pro optimální návrh a realizaci obvodu. V práci je obsažena kompletní konstrukce zařízení včetně napájecího zdroje a doplňkových obvodů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Reproduktor, parametry reproduktoru, zesilovač, ochrana, horní propust, dolní propust, výchylka, filtr, kmitočet, ozvučnice, simulace.

ABSTRACT

The present work deals with the issue of speaker damage due to large displacement of the membrane at low frequencies. The main focus is the design and construction of the circuit to protect the speakers from this type of damage and the subsequent measurement of its parameters. The thesis includes theoretical predictions for the optimal design and implementation of the circuit. The work includes complete construction of equipment, including power supply and auxiliary circuits.

KEYWORDS

Speaker, speaker parameters, amplifier, protection, highpass, lowpass, deflection, filter, frequency, cabinet, simulation.

PŘIBYL, Libor *Zesilovač s ochranou reproduktoru*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 68 s. Vedoucí práce byl Ing. David Kubánek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Zesilovač s ochranou reproduktoru“ 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 diplomové práce panu Ing. Davidu Kubánkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

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)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OP Výzkum a vývoj
pro inovace

OBSAH

Úvod	12
1 Reprodaktor	13
1.1 Obecné parametry	14
1.1.1 Výchylka reproduktoru	14
1.2 Ozvučnice reproduktoru	15
1.3 Měření parametrů	15
2 Uvažované návrhy	17
2.1 Návrhy na regulaci	17
2.1.1 Návrh s dolní propustí 1	17
2.1.2 Návrh s dolní propustí 2	17
2.1.3 Návrh s horní propustí	18
2.2 Návrh na utlumení	19
3 Omezovač	20
3.1 Limiter	20
3.2 Diodový limiter	21
3.2.1 Základní zapojení	21
3.2.2 Rozšíření limiteru	21
3.2.3 Řízený limiter	22
4 Měření parametrů	25
5 Teoretický návrh	28
5.1 Návrh regulace	28
5.1.1 Výpočty	29
5.1.2 Popis zapojení	29
5.1.3 Schéma zapojení	30
6 Simulace	31
7 Praktické řešení	33
7.1 Schéma zapojení	34
7.2 Popis zapojení	34
7.2.1 Napájecí zdroj	34
7.2.2 Zpožďovací linka	35
7.2.3 Limiter	36

7.2.4	Indikace	38
8	Konstrukce	40
9	Nastavení zařízení	42
10	Výsledné parametry zařízení	43
10.1	Elektrické parametry získané měřením	43
10.2	Funkce limiteru	43
10.3	Funkce filtru zpětné vazby	44
11	Závěr	47
	Literatura	48
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	49
	Seznam příloh	50
A	Tabulky naměřených hodnot	51
A.1	Naměřené hodnoty pro simulaci	51
B	Graf simulace	54
C	Deska plošných spojů	55
C.1	Návrh motivu plošného spoje	55
C.1.1	DPS celého obvodu - strana spojů (top)	55
C.1.2	DPS celého obvodu - strana spojů (bottom)	56
C.2	Osazovací výkresy	57
C.2.1	Osazení obvodu - strana spojů (top)	57
C.2.2	Osazení obvodu - strana spojů (bottom)	58
C.3	Seznam součástek	59
D	Fotodokumentace	63
D.1	Finální provedení navrženého zařízení	63
E	Obsah přiloženého CD	65
F	Technické výkresy	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Řez reproduktorem [2]	13
2.1	Blokové schéma návrhu s dolní propustí 1	17
2.2	Blokové schéma návrhu s dolní propustí 2	18
2.3	Blokové schéma návrhu s horní propustí	18
2.4	Návrh s posunem horní propusti	19
2.5	Blokové schéma pevného utlumení	19
3.1	Omezovač amplitudy	20
3.2	Blokové schéma návrhu s dolní propustí 1	21
3.3	Základní zapojení pro omezení kladné půlvlny	22
3.4	Omezení kladné půlvlny pomocí diody	23
3.5	Antiparalelní zapojení s větším počtem diod	23
3.6	Řízení propustnosti diody	24
3.7	Řízení propustnosti diody	24
4.1	Zkreslení signálu vlivem velké výchylky reproduktoru	25
4.2	Graf závislosti výchylky reproduktoru	26
4.3	Závislost výchylky reproduktoru X_{max} na výstupním napětí $U_{výst}$	27
5.1	Obecné schéma návrhu řešení	28
5.2	Schéma zapojení ochrany reproduktoru	30
6.1	Převodní charakteristika pro frekvenci $f = 85$ Hz.	31
6.2	Graf funkce pro $f = 85$ Hz	32
7.1	Blokové schéma celého zařízení	33
7.2	Kompletní schéma zapojení	34
7.3	Schéma zapojení napájecího zdroje	35
7.4	Schéma zapojení zpoždovací linky	35
7.5	Schéma zapojení limiteru	36
7.6	Charakteristika limiteru s doplněným rezistorem R28	37
7.7	Schéma zapojení indikace limitace vstupního signálu	38
7.8	Schéma zapojení indikace limitace výstupního signálu	39
8.1	Finální provedení navrženého zařízení	41
9.1	Výsledné měření 5"reproduktoru VISATON FR 13	42
10.1	Graf závislosti harmonického zkreslení na vstupním napětí pro $f = 1$ kHz	43
10.2	Závislosti amplitudy výstupního signálu na amplitudě vstupního signálu při různých frekvencích a různých zesíleních koncového zesilovače	44
10.3	Graf závislosti výchylky na frekvenci pro limitovaný a nelimitovaný signál	45

10.4	Graf závislosti výstupního napětí na frekvenci pro extrémní podmínky	46
B.1	Graf závislosti výstupního napětí na frekvenci při limitaci	54
D.1	Čelní pohled na přístrojovou skříň	63
D.2	Zadní pohled na přístrojovou skříň	64
D.3	Vnitřní pohled do přístrojové skříňe	64

SEZNAM TABULEK

A.1	Hodnoty výchylky vyjádřené amplitudou napětí z laserového měřiče .	52
A.2	Hodnoty výchylky X_{max}	53

ÚVOD

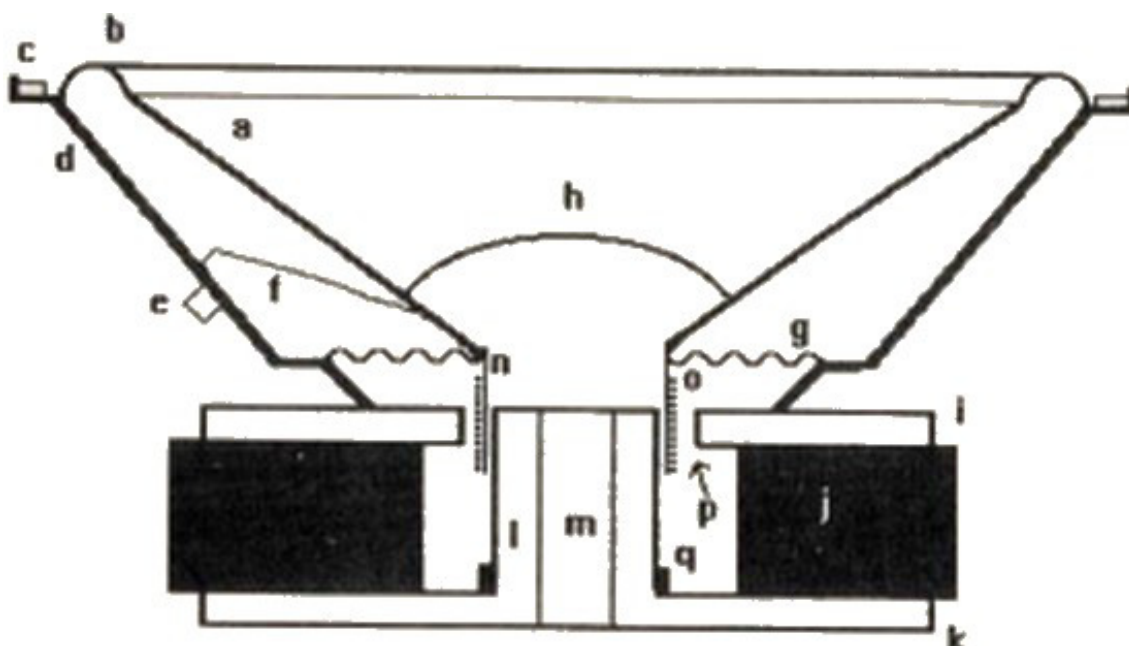
Problematika ochrany reproduktoru před poškozením velkou výchylkou membrány na nízkých kmitočtech je jednou ze dvou možných poškození vlivem velkého vstupního signálu do reproduktoru. Ať už se jedná o kombinaci přebuzení zesilovače velkým vstupním signálem, který je následně zesílený nebo nadměrným zesílením koncového zesilovače.

Druhým typem poškození vlivem přebuzení nebo neúměrného zesílení je poškození cívky reproduktoru, kdy dojde ke spálení vinutí. K tomuto poškození dochází nejčastěji u stredo-tónových a vysoko-tónových reproduktorů. Tomuto poškození je možné zamezit například použitím limiteru. V této práci je obsažen doplněk k výslednému zařízení, ve kterém je tato problematika rovněž zmíněna a je jí předcházeno.

Výstupem této práce je zkonstruování kompletní ochrany reproduktoru včetně měření charakteristik 5"reproduktoru, uvažovaných návrhů, simulace obvodu, praktické řešení s doplňkovými obvody a následné odzkoušení v praxi. Práce je směřována na ochranu 5"reproduktoru v bezodrazovém měřicím boxu, který je uzavřenou ozvučnicí.

1 REPRODUKTOR

Reproduktory slouží jako převodníky elektrického signálu na signál akustický. Rozdělují se na reproduktory nepřímo vyzářující a přímo vyzářující, se kterými budeme v tomto návrhu počítat. U tohoto druhu reproduktorů je akustická energie vyzářována membránou navazující přímo na prostředí, kam je energie přenášena. Základem těchto reproduktorů je cívka a permanentní magnet. Cívka se pohybuje ve válcové štěrbině mezi pólovými nástavci magnetického obvodu. Princip činnosti spočívá v působení síly na vodič, kterým protéká elektrický proud v magnetickém poli. Síla se přenáší na membránu a způsobuje její pohyb [1].



Obr. 1.1: Řez reproduktorem [2]

- a - membrána
- b - horní závěs membrány
- c - těsnění
- d - koš
- e - svorky pro připojení vodičů
- f - elektrické přívody ke kmitací cívce
- g - středící prvek
- h - vrchlík
- i - horní deska
- j - magnetický obvod
- k - zadní deska
- l - pólový nástavec

- m - otvor pro odvod tepla
- n - kostra kmitací cívky
- o - kmitací cívka
- p - mezera
- q - zkratovací prstenec (slouží proti přetížení reproduktoru)

1.1 Obecné parametry

Parametry reproduktorů jsou definovány normami IEC, které jsou v ČR převzaty do norem ČSN (40). Někteří výrobci ovšem tuto normu nepoužívají buď vůbec, nebo jen částečně. Potřebné parametry se tudíž bez podrobného měření není možné dozvědět. Maximální výchylka je často u levnějších reproduktorů neuváděna. Buď z důvodu marketingového, nebo není považována za potřebnou. Vedlejší parametry, jako například rozměry reproduktoru, hmotnost magnetu, magnetická intenzita, hmotnost, stejnosměrný odpor cívky, indukčnost cívky, hmotnost kmitajícího systému, poddajnost a efektivní plocha membrány se používají při výpočtech a návrhu výhybky a reprosoustavy, ale pro výběr reproduktoru nejsou považovány za příliš podstatné [1].

1.1.1 Výchylka reproduktoru

Z rovnice pro akustický výkon 5.1, kde S je plocha desky, y_M je maximální efektivní velikost výchylky a f je kmitočet zvukového vlnění vyplývá, že při konstantní ploše desky a konstantním výkonu je výchylka nepřímo úměrná kmitočtu signálu přenášeného reproduktorem. Proto se při klesajícím kmitočtu signálu musí výchylka membrány reproduktoru zvyšovat, aby akustický výkon zůstal konstantní. Do určité velikosti výchylky se reproduktor chová jako lineární měnič, při vyšších výchylkách dojde k nelineárnímu zkreslení zvukového signálu [1].

$$P = 0,168S^2y_Mf^4 \quad (1.1)$$

Maximální výchylka reproduktoru X_{max} [mm]

Můžeme se setkat se dvěma způsoby měření výchylky. Tím serióznějším je $X_{max0} - peak$, což znamená, že příslušná hodnota např. 8 mm je maximální povolený posuv membrány z klidu do maxima pouze na jednu stranu. Druhým způsobem měření je $X_{max}peak - peak$, což je ve skutečnosti dvojnásobná hodnota parametru $X_{max0} - peak$, jelikož reproduktor se pohybuje stejným způsobem i na opačnou stranu ve své ose.

Podle parametru X_{max} lze poznat, zda je příslušný reproduktor spíše středobasový nebo spíše subwoofer. Středobasy se vyznačují vyšší citlivostí, ale menším X_{max} (2 – 5 mm), tzn. že nemají takovou možnost rozvibrovat vzduch. Subwoofery mají sice o něco nižší citlivost, avšak vyšší X_{max} (6 – 10 mm). Při rozumném překročení X_{max} například nevhodným signálem se reproduktor nepoškodí, ale začne postupně zkreslovat. Při překračování této hodnoty dochází částečně k vychylování mimo magnetický obvod. Tím dochází ke vzniku harmonického zkreslení při buzení reproduktoru harmonickým signálem a ke vzniku intermodulačního zkreslení při reprodukci složených signálů. Poškození nastává až po překročení X_{lim} [2].

Maximální výchylka reproduktoru X_{lim} / X_{damage} [mm]

Parametrem X_{lim} nebo také X_{damage} se udává maximální výchylka membrány před mechanickým poškozením reproduktoru. Pokud se tento parametr překročí, dojde k nenávratnému mechanickému poškození. Kmitající cívka narazí na dno magnetického obvodu a zdeformuje se, nebo naopak se vytrhne membrána se závěsem od koše reproduktoru, takže reproduktor není schopen dalšího provozu. Není to obvyklé, většinou bývá dostatečná rezerva, která před tímto poškozením reproduktor chrání. Něco ale na reproduktoru povolí a reproduktor tak přestane plnit svou funkci. Obvykle se tento parametr uvádí jako *peak – peak*, u subwoofery pak dosahuje hodnoty i přes 50 mm [4].

1.2 Ozvučnice reproduktoru

Za ozvučnici reproduktoru je považována reproduktorová skříň, jež působí mezi přední a zadní stranou reproduktoru tak, aby se vyrušil tzv. *akustický zkrat*, ke kterému dojde nevhodným návrhem ozvučnice, kdy se navzájem vyruší na určitých kmitočtech vlna z přední a zadní části reproduktoru z důvodu opačné fáze. Vhodným návrhem ozvučnice dojde ke změně vyzařovací impedance reproduktoru a tím i maximální výchylky pro určité kmitočty, tudíž reproduktor odolá většímu výkonu [2].

1.3 Měření parametrů

Jak je zmíněno v 1.1, někteří výrobci neuvádějí námi uvažovanou hodnotu výchylky reproduktoru jak X_{max} , tak ani X_{lim} . Tato hodnota je zároveň závislá i na zmíněné ozvučnici reproduktoru, proto je nejvhodnější si tuto hodnotu změřit. Jako vztahovou hodnotou pro řešení ochrany reproduktoru použijí hodnotu maximální výchylky

X_{max} , jelikož při této hodnotě dochází k nežádoucímu zkreslení a zároveň je to hodnota, kdy ještě nedojde k mechanickému poškození. Pro tuto hodnotu je třeba znát i její průběh v závislosti na frekvenci, jak pro typ ochrany úplným odříznutím frekvenční části, tak i pro plynulou regulaci ochrany. V této práci je pro měření závislosti výchylky na kmitočtu použit laserový měřič rychlosti. Podle vzorce 1.2 odvozeného z teorie fyziky, integrací rychlosti podle času získáme hodnotu vzdálenosti, tedy výchylku reproduktoru. Měření výstupního napětí zesilovače je provedeno se zátěží 8 Ω , jenž je při měření připojena na výstup zesilovače

$$\int A \cos(2\pi \cdot f \cdot t) dt \quad (1.2)$$

- A - velikost amplitudy napětí
- f - frekvence
- t - čas

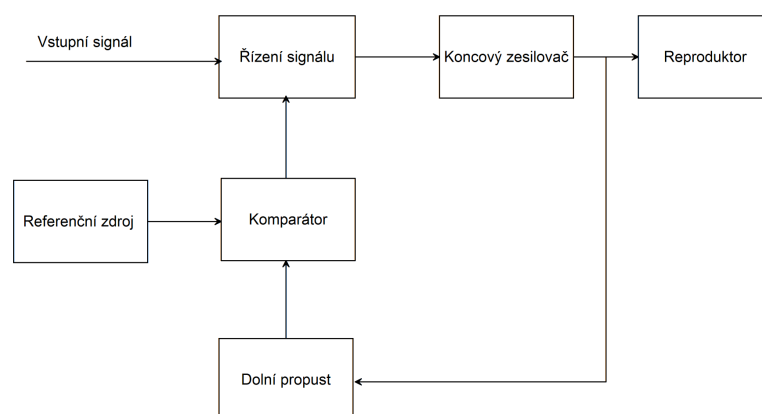
2 UVAŽOVANÉ NÁVRHY

Na základě teoretických předpokladů vzniklo několik návrhů a možností k řešení této problematiky.

2.1 Návrhy na regulaci

2.1.1 Návrh s dolní propustí 1

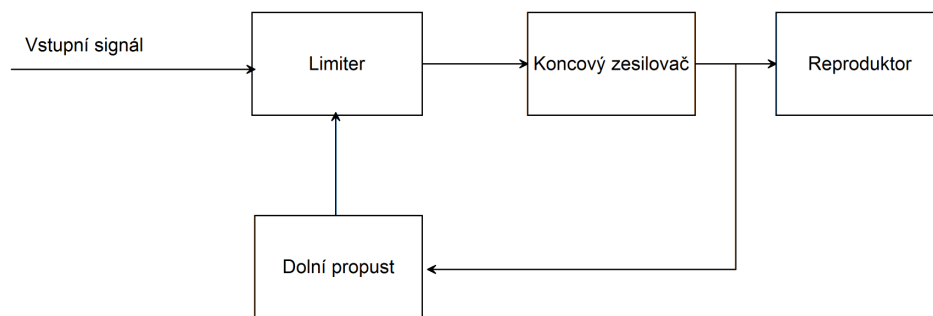
Navrhovaná regulace bude udržovat hraniční hodnotu X_{max} tak, že snímaná amplituda napětí výstupního signálu z koncového zesilovače bude porovnávána s referenčním napětím. Řídící člen pak bude regulovat amplitudu vstupního signálu na základě výstupu komparátoru. Signál z výstupu koncového zesilovače bude filtrován přes dolní propust, která ohraničí pásmo, kde má reproduktor možnost překročení hodnoty X_{lim} tak, aby ostatní frekvence nebyly omezovány.



Obr. 2.1: Blokové schéma návrhu s dolní propustí 1

2.1.2 Návrh s dolní propustí 2

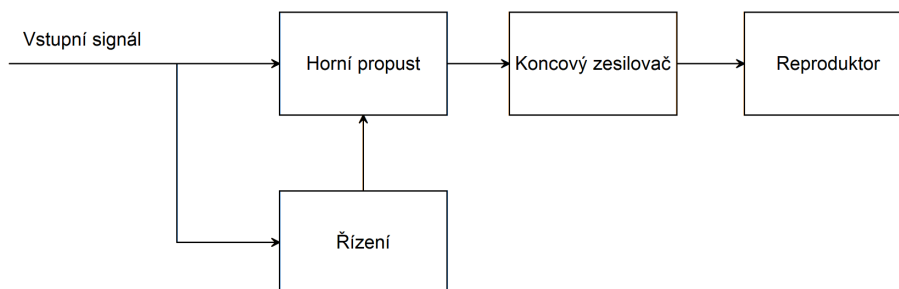
Dalším z uvažovaných řešení a zároveň použitým v následující části práce je návrh s dolní propustí. V tomto řešení dominuje limiter pro vybranou kmitočtovou oblast, který je řízený výstupním signálem koncového zesilovače. Do výpočtem dané oblasti určené mezní frekvencí f_c bude obvod nekompromisně limitovat amplitudu signálu. Od mezní frekvence f_c , kdy už přímka charakteristiky reálné dolní propusti klesá a zároveň klesá i výchylka reproduktoru X_{max} , se hraniční hodnota limitace snižuje.



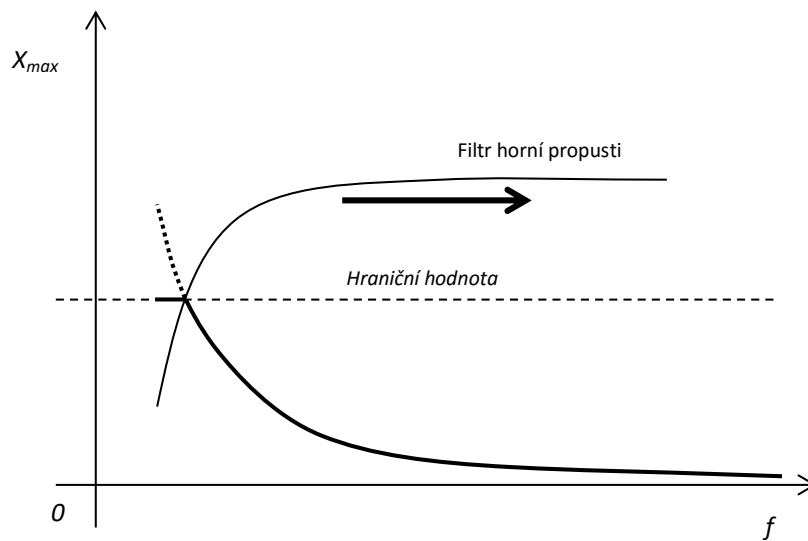
Obr. 2.2: Blokové schéma návrhu s dolní propustí 2

2.1.3 Návrh s horní propustí

Návrh na regulaci hraniční hodnoty X_{max} je v tomto případě řešen posunem mezní frekvence filtru horní propusti. Se zvyšující se amplitudou vstupního signálu do zesilovače se bude mezní frekvence f_c použitého filtru horní propusti posouvat tak, aby se hodnota X_{max} udržovala na konstantní hodnotě. V tomto návrhu však musí být počítáno s pevným nastavením zesílení koncového zesilovače, aby nedošlo k překročení výstupního napětí na koncovém zesilovači. Řízení zesílení bude pouze pomocí předzesilovače nebo vstupního obvodu do koncového zesilovače.



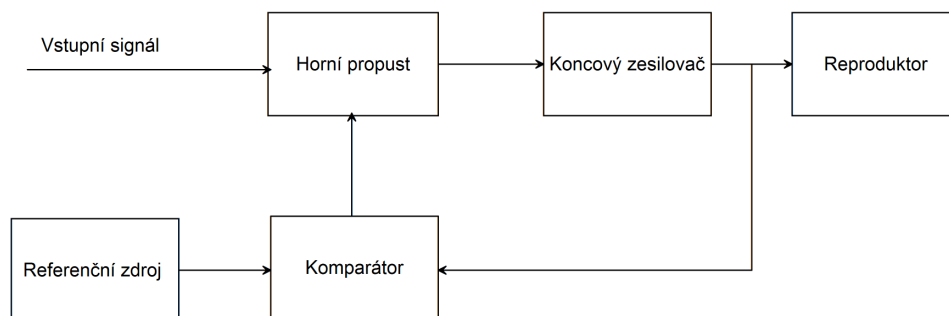
Obr. 2.3: Blokové schéma návrhu s horní propustí



Obr. 2.4: Návrh s posunem horní propusti

2.2 Návrh na utlumení

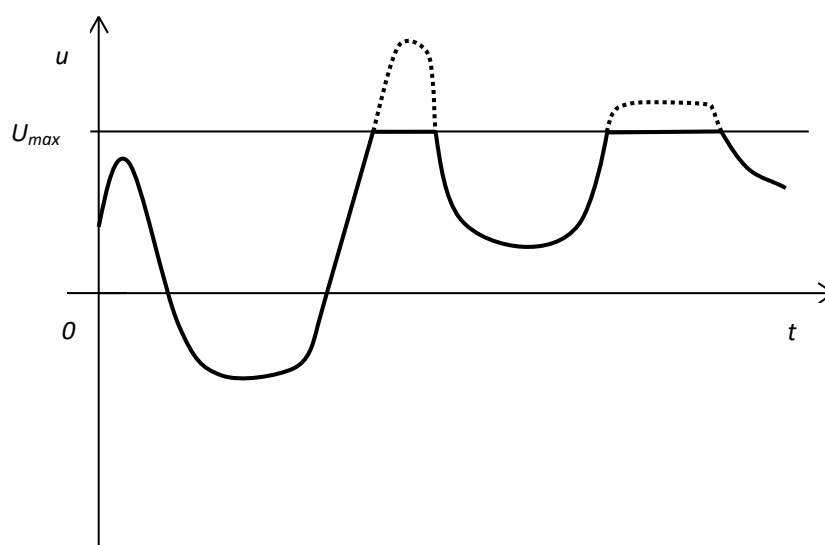
Návrh na utlumení (oříznutí) kmitočtu spočívá v opětovném použití filtru horní propusti, kdy po překročení stanovené prahové hodnoty napětí na svorkách reproduktoru dojde k vřazení pevně nastavené mezní frekvence filtru f_c . Přes komparátor bude porovnáváno výstupní napětí koncového zesilovače s referenčním zdrojem napětí a na základě jeho výstupu bude vřazen filtr horní propusti.



Obr. 2.5: Blokové schéma pevného utlumení

3 OMEZOVAČ

Omezovače patří mezi základní stavební prvky většiny regulačních obvodů. Nejčastěji se můžeme setkat se dvěma základními typy: omezovače amplitudy a omezovače strmosti signálu. V tomto případě budeme uvažovat pouze o omezení amplitudy, která je přímo závislá na výchylce reproduktoru. Omezovače amplitudy se používají v regulačních obvodech, například pro úpravu signálu na vstupu nebo výstupu regulátoru. Důsledkem je omezení regulované hodnoty (např. otáček, proudu, napětí) na určitou mez. Činnost omezovače je dobře pochopitelná z obrázku 3.1.

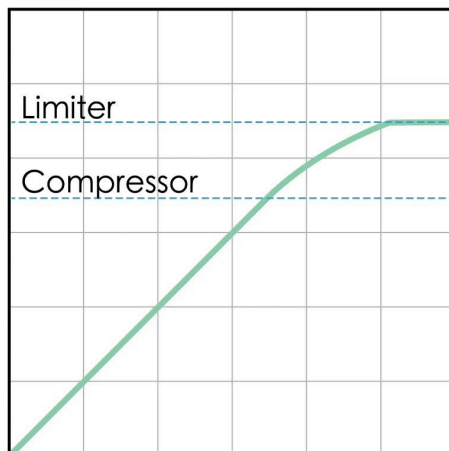


Obr. 3.1: Omezovač amplitudy

3.1 Limiter

V souvislosti s omezením signálu, v oblasti zvuku a zvukové techniky, se používá limiter. Tedy obvod zabráňující překročení prahové hodnoty (threshold) signálu. Ten spadá do kategorie obvodů pro úpravu dynamiky signálu. Dynamikou signálu rozumíme bezrozměrnou veličinu vyjadřující poměr mezi maximální a minimální rozlišitelnou velikostí signálu. Limiter je speciálním případem kompresoru.

Limiter je využíván jako součást nejrůznějších audio přístrojů. Často má jediný ovládací prvek THRESHOLD, ale nemusí mít žádný. Limiter je používán jako samostatný přístroj, třeba v podobě efektového pedálu, nebo je jeho částí. Bývá vestavěn v nástrojových aparaturách, zvláště pro basovou kytaru, v koncových zesilovačích



Obr. 3.2: Blokové schéma návrhu s dolní propustí 1

pro PA (kde často nemá žádný ovládací prvek a je trvale zařazen) a podobných aplikacích, kde omezuje zkreslení výstupního signálu v případě, že je vstupní signál vyšší, než je schopen zesilovač zpracovat.

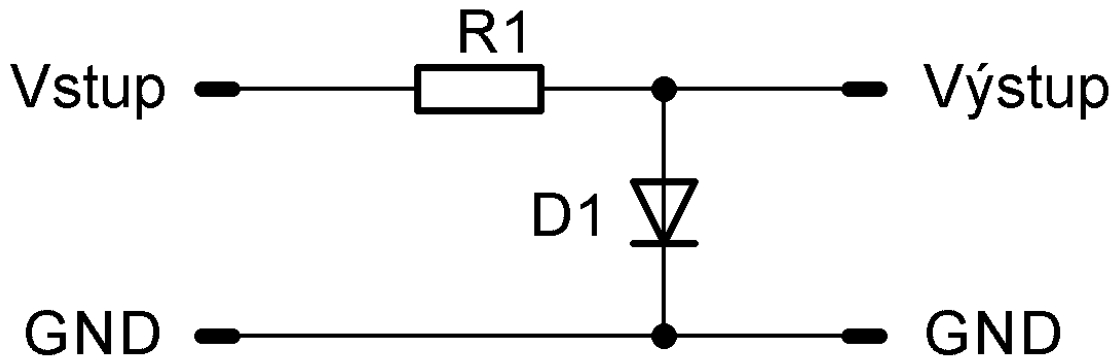
3.2 Diodový limiter

3.2.1 Základní zapojení

Jednou z možností omezení amplitudy signálu je použití diod, kdy je v základním zapojení dioda připojena mezi signál a zem. Využívá se zde charakteristických vlastností diody, kdy dioda vede pouze v propustném směru a to až od prahové hodnoty U_p . Tato hodnota je rovna přibližně 0,6 V - 0,7 V, podle druhu diody. Po překročení této hodnoty dochází k přivedení signálu proti zemi a tím omezení rozsahu amplitudy v kladné části. Výhodou tohoto omezovače je, že signál neomezuje ostře, ale zaobleně a v limitaci (pro audio aplikace) je poslechově příjemnější, než ostré limitace.

3.2.2 Rozšíření limiteru

Nejčastější způsob je zapojení s antiparalelní dvojicí diod. Omezuje vstupní napětí jak pro kladnou, tak i pro zápornou půlvlnu signálu viz. obrázek 3.5. Toto zapojení v součtu dvou diod omezí rozsah napětí na přibližně 1,2 V. Tam kde tato hodnota



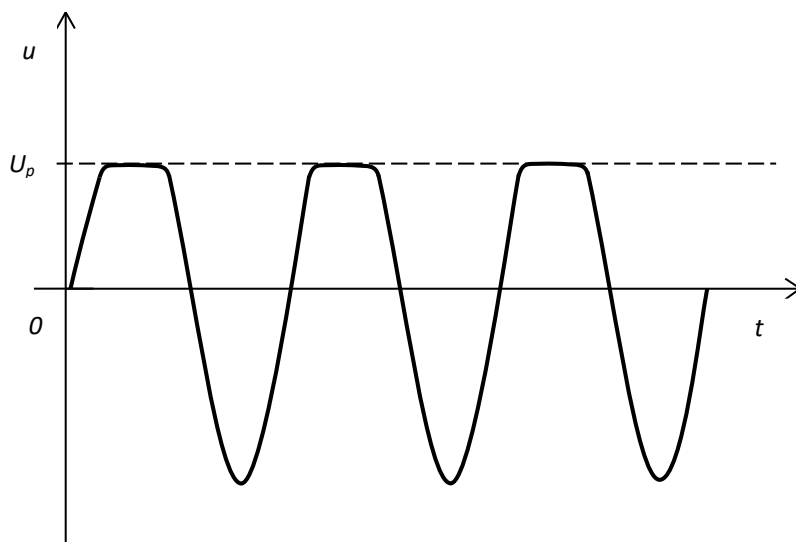
Obr. 3.3: Základní zapojení pro omezení kladné půlplny

nestačí může být také použito antiparalelní zapojení diod s tím rozdílem, že diod v jedné větvi antiparalelního zapojení bude více.

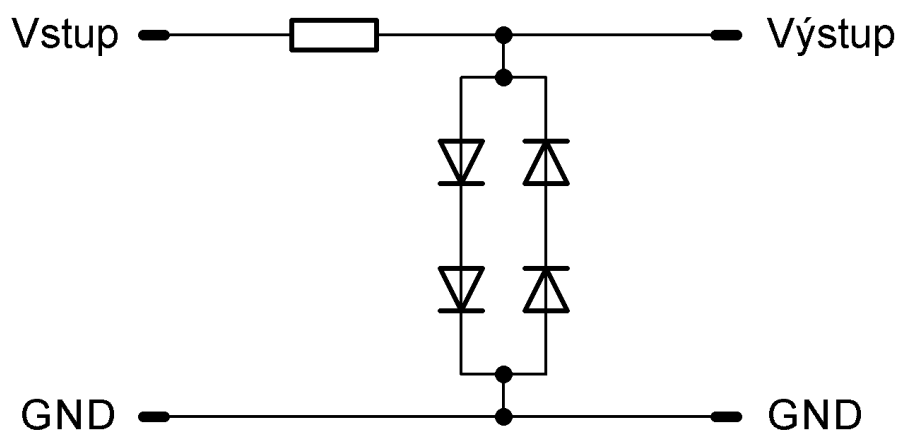
3.2.3 Řízený limiter

Tento druh limiteru umožňuje snadnou regulaci nastavením prahu propustnosti diody. Regulace spočívá v zapojení zdroje do série s diodou proti zemi. V takovém zapojení je možné nastavit práh limitace pomocí napětí na zdroji V_1 .

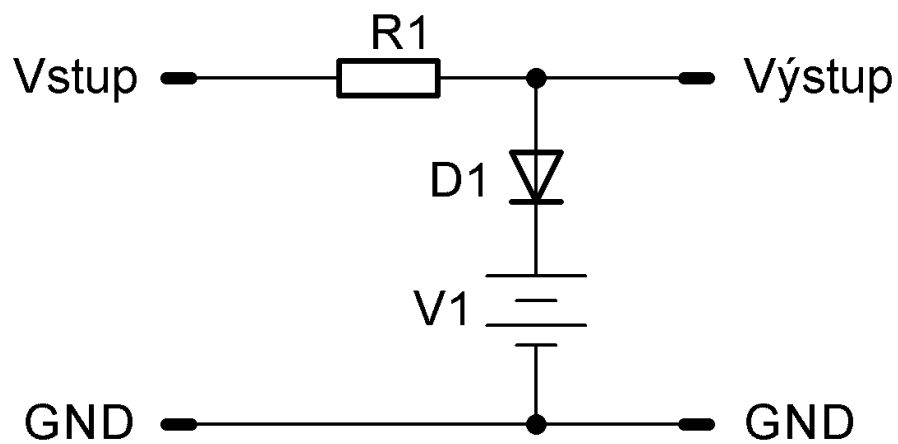
Například v případě, že napětí na V_1 je nastaveno na hodnotu 4 V, pak sinusové napětí signálu na anodě musí být větší než $4,0 \text{ V} + 0,6 \text{ V} = 4,6 \text{ V}$, aby došlo k omezení. Toto zapojení je možné použít i v opačném zapojení pro zápornou půlplnu signálu. V kombinaci s antiparalelním zapojením je možnost řídit nezávisle každou půlplnu.



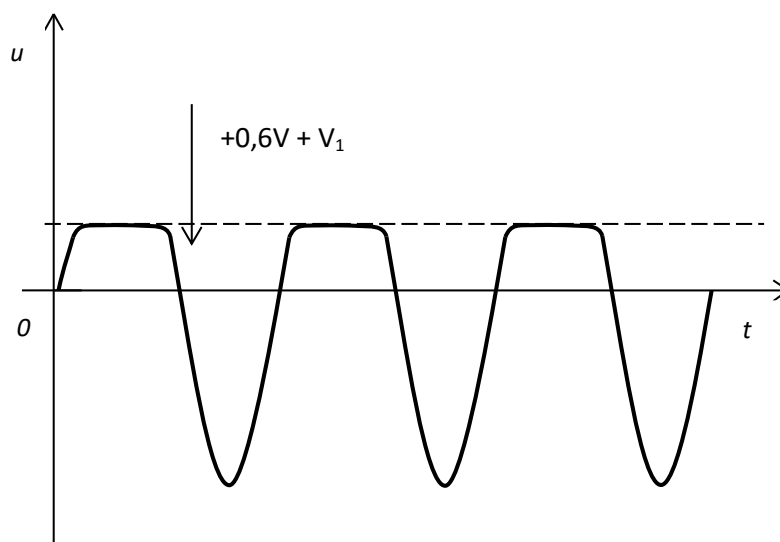
Obr. 3.4: Omezení kladné půlvlny pomocí diody



Obr. 3.5: Antiparalelní zapojení s větším počtem diod



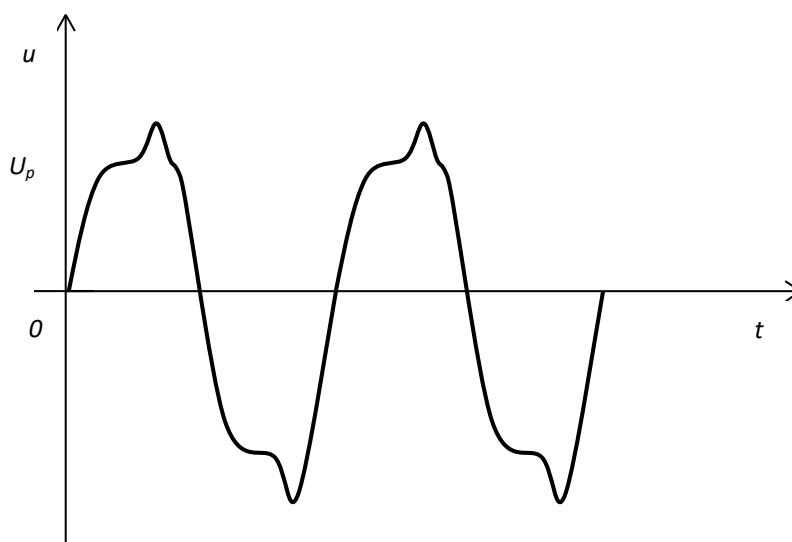
Obr. 3.6: Řízení propustnosti diody



Obr. 3.7: Řízení propustnosti diody

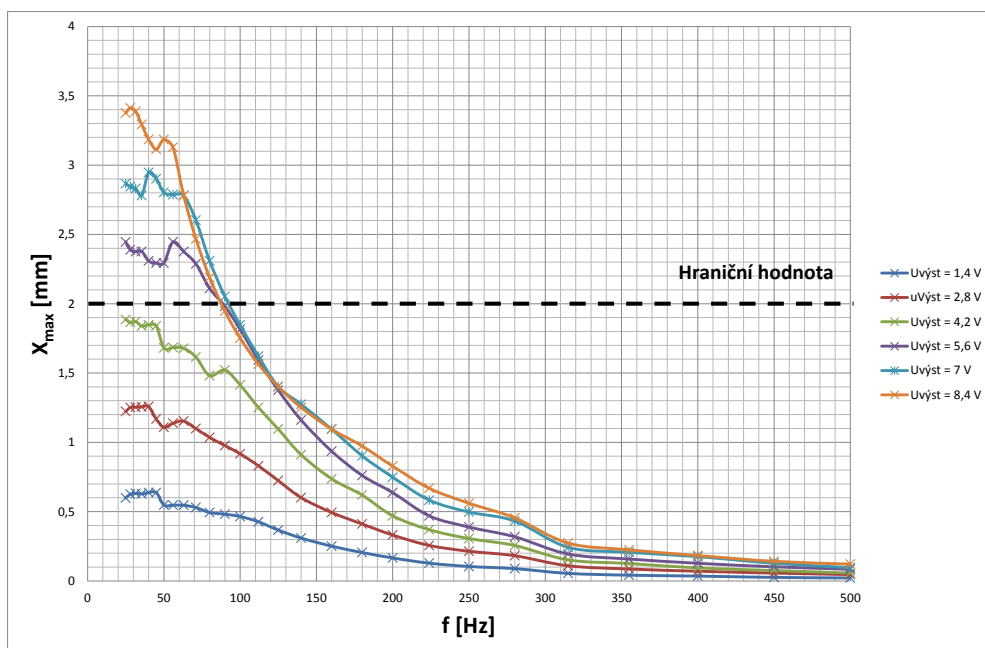
4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ

Na základě těchto měření je vhodně vybrán způsob ochrany reproduktoru. Hlavní částí měření je měření závislosti výchylky X_{max} na frekvenci pro různé hodnoty výstupního napětí na zesilovači se zátěží. K měření výchylky reproduktoru je použit laserový měřič rychlosti, kde výsledná hodnota je udávána amplitudou napětí. Napětí je odečítané pomocí osciloskopu, který je připojen na výstup laserového měřiče. Při výstupním napětí zesilovače $U_{výst} = 4,2$ V byla amplituda sledovaná na osciloskopu. Signál byl stále bez zkreslení, což určilo hodnotu $X_{max} = 2$ mm. Pro další dvě hodnoty $U_{výst} = 5,6$ V byla amplituda již zkreslená. To se projevilo deformací signálu sledovaného na osciloskopu 4.1. Následně je třeba tyto hodnoty přepočítat pomocí vzorce 1.2, kdy výpočtem získáme hodnoty X_{max} v závislosti na kmitočtu A.2.

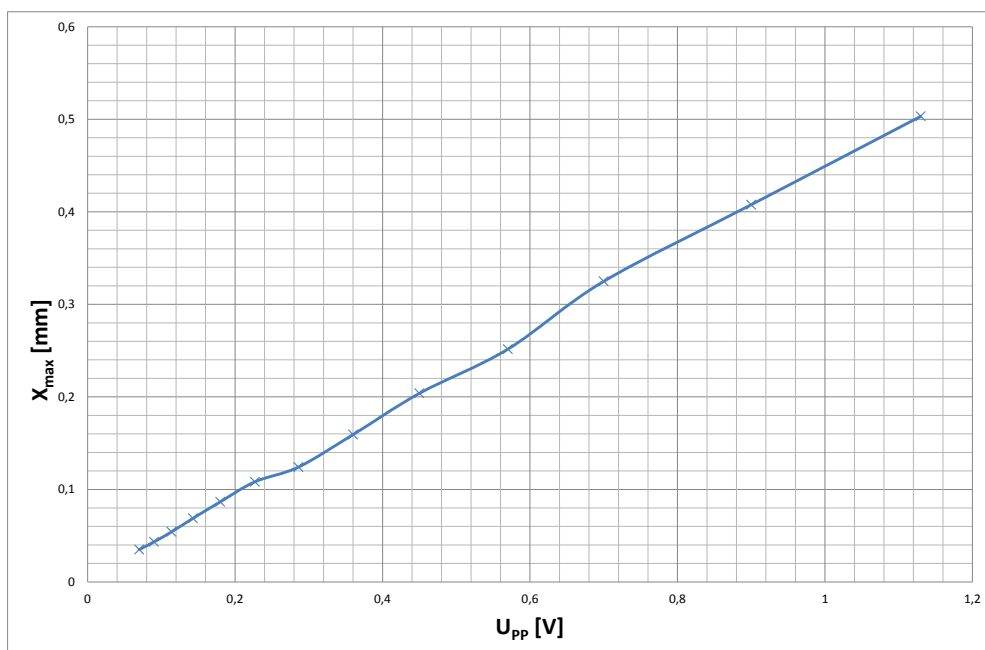


Obr. 4.1: Zkreslení signálu vlivem velké výchylky reproduktoru

Z těchto přepočítaných hodnot je vynesena graf závislosti výchylky reproduktoru X_{lim} na frekvenci f pro různá výstupní napětí zesilovače $U_{výst}$. Na tomto grafu je zároveň zakreslena zvolená hraniční hodnota pro hodnotu $X_{max} = 2$ mm. Tato hodnota je zvolená s ohledem na již zmíněné zkreslení a pro předdimenzování této hodnoty. Z grafu 4.3 je patrné, že pro konstantní hodnotu frekvence se výchylka lineárně zvětšuje s rostoucím výstupním napětím. To je uvažováno za vztažnou hodnotu pro následný návrh a řízení regulace.



Obr. 4.2: Graf závislosti výchylky reproduktoru



Obr. 4.3: Závislost výchylky reproduktoru X_{max} na výstupním napětí $U_{výst}$

5 TEORETICKÝ NÁVRH

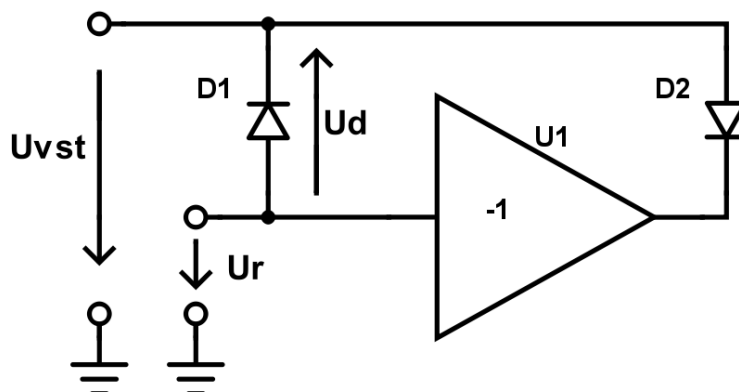
V této části je popsána a řešena ochrana 5"reproduktoru osazeného v bezodrazovém měřícím boxu. Bezodrazový box je uzavřenou ozvučnicí.

5.1 Návrh regulace

Nejvhodněji zvolené řešení je regulace řízeným limiterem. Toto řešení je zvoleno z důvodu plynulé regulace a bezpečnosti v případě, že by byl použit koncový zesilovač s proměnným zesílením. Z tabulky naměřených hodnot A.2 a z grafu 4.2 je určen jako mezní kmitočet dolní propusti $f_c = 85$ Hz. V okolí této frekvence je hodnota výchylky nejvyšší.

Omezení signálu v obvodu je zajištěno diodovým limiterem, jehož funkce je popsána v kapitole Diodový limiter 3.2. Diody jsou připojeny mezi vstupní signál a virtuální zem. Dioda D1 se otevře v propustném směru při přibližně $-0,6$ V. To znamená, že je půlplna vstupního napětí $U_d < -0,6$ V přivedena proti zemi a tím limitována. Naopak při $U_d > -0,6$ V nebude vstupní napětí U_{vst} omezeno. Zapojení proti zemi je nahrazeno řídicím obvodem, tedy přivedením řídicího napětí U_r . Podle 2. Kirchhoffova zákona lze vyjádřit vzorec 5.1. Změnou napětí U_r se tedy změní i velikost napětí U_d , a tím povolený rozkmit jedné půlplny amplitudy U_{vst} . Přes inverter řídicího napětí je zapojena dioda D2 s opačnou polaritou pro druhou opačnou půlplnu vstupního signálu U_d .

$$U_{vst} - U_r + U_d = 0 \quad (5.1)$$



Obr. 5.1: Obecné schéma návrhu řešení

5.1.1 Výpočty

Nejdůležitějším výpočtem při použití následujícího řešení je výpočet hodnot dolní propusti RC [3], která je vřazena do řídicí větve, aby k limitaci docházelo pouze v kmitočtovém pásmu, kde se podle naměřených hodnot velká výchylka vyskytuje. Ty vypočítáme podle vzorce 5.1.1, ze kterého si vyjádříme výpočet kapacity kondenzátoru C .

$$C = \frac{1}{2\pi f R} \quad (5.2)$$

Jako výchozí hodnota je do výpočtu použita hodnota rezistoru $R = 10 \text{ k}\Omega$

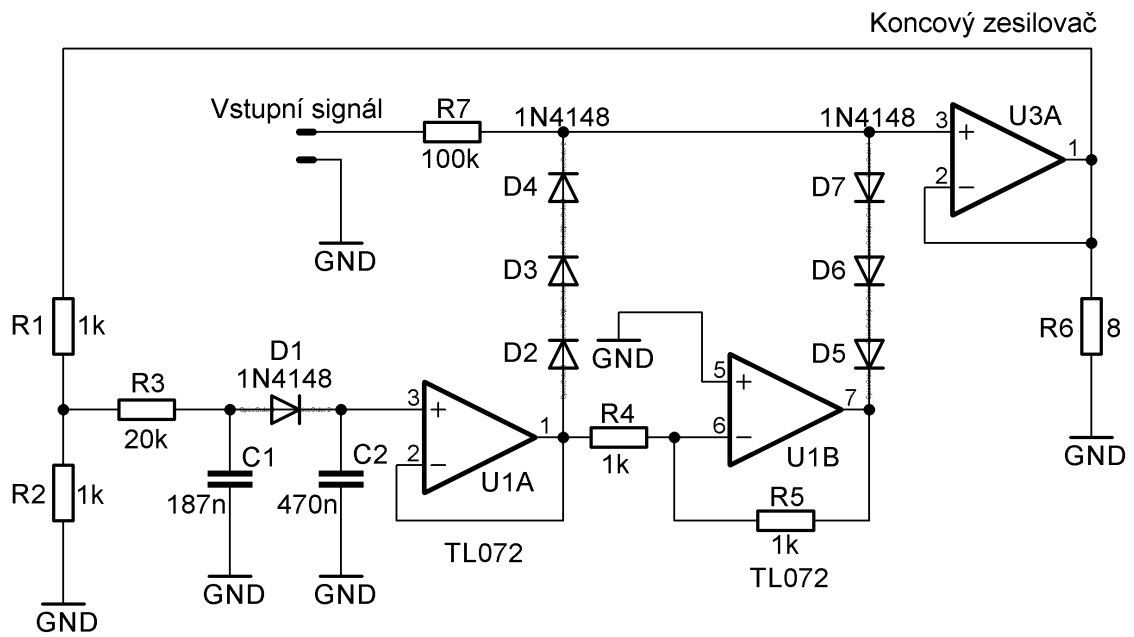
$$C = \frac{1}{2\pi f R} = \frac{1}{2\pi \cdot 85 \cdot 10 \cdot 10^3} = 1.87 \cdot 10^{-7} \text{ F}$$

Ostatní hodnoty součástek výsledného zapojení jsou zvoleny podle simulace tak, aby vyhovovaly předpokladům funkce a jsou odůvodněny v 5.1.2.

5.1.2 Popis zapojení

Hlavní roli tohoto návrhu hrají diody D2 až D7, které zahrnují funkci řízení limiteru. Ve schématu jsou použity jako spínací prvky, které limitují svojí hodnotou napětí 6 V. Sériovým řazením tří diod je dosaženo vyššího rozpětí omezení. Napětí pro průchod diodami je tedy 1,8 V pro kladnou a 1,8 V pro zápornou hodnotu napětí vstupního signálu. Signál do velikosti $U_{vst} = 3,6 \text{ V}$ není limitován. Zároveň je z výstupu zesilovače přiveden řídicí signál. Tento signál představuje napětí snížené přes odporový dělič tvořený rezistory R1 a R2, kde právě tímto děličem je možné nastavovat velikost utlumení, a tím velikost námi zvolené maximální výchylky X_{max} . Rezistor R3 společně s kondenzátorem tvoří filtr dolní propusti, kterou je vymezena oblast limitace. Signál o příslušné frekvenci projde přes filtr a je usměrněn diodou D5. Kondenzátor C2 slouží jako vyhlazovací pro usměrněné napětí řídicího signálu. Ten je dále přes operační zesilovač U1 oddělen, aby nedocházelo k zatěžování předchozích prvků v obvodu. Za toto oddělení je přivedena první trojice diod D5 - D7, na kterých dochází k řízení úbytku napětí U_d řídicím napětím U_r . Zesilovač U2 je připojen v obvodu jako invertor pro zápornou hodnotu napětí U_{vst} , kde hodnoty rezistorů R4 a R5 jsou zvoleny s ohledem na přenos 1 a na nízký šum v obvodu.

5.1.3 Schéma zapojení

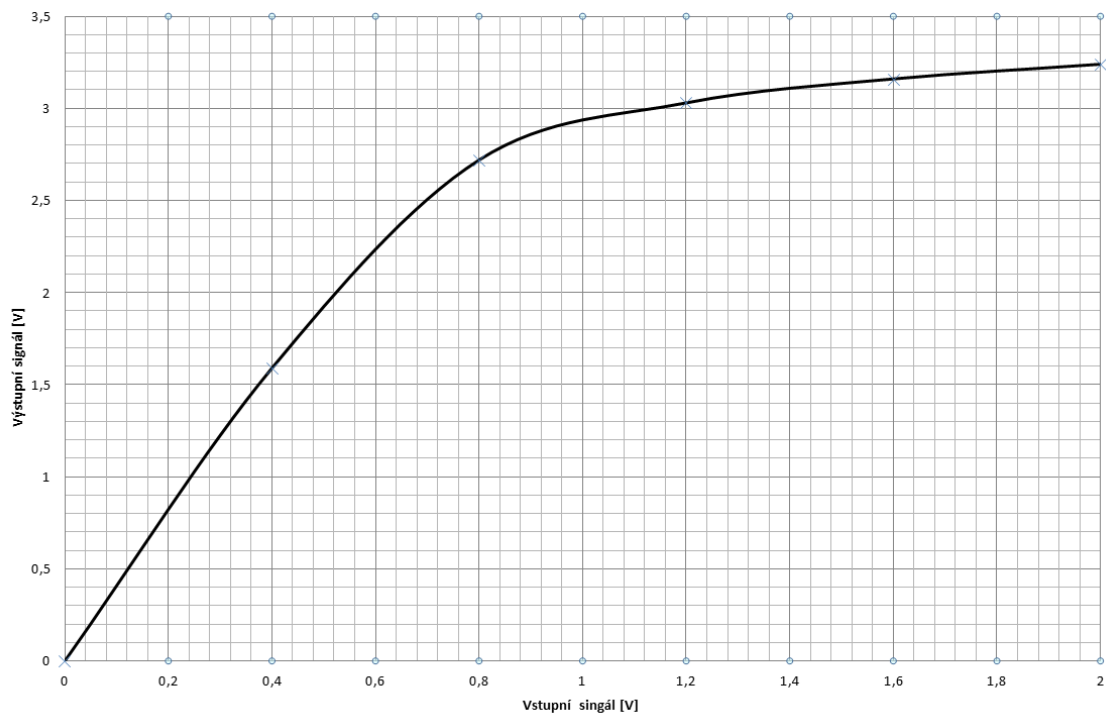


Obr. 5.2: Schéma zapojení ochrany reproduktoru

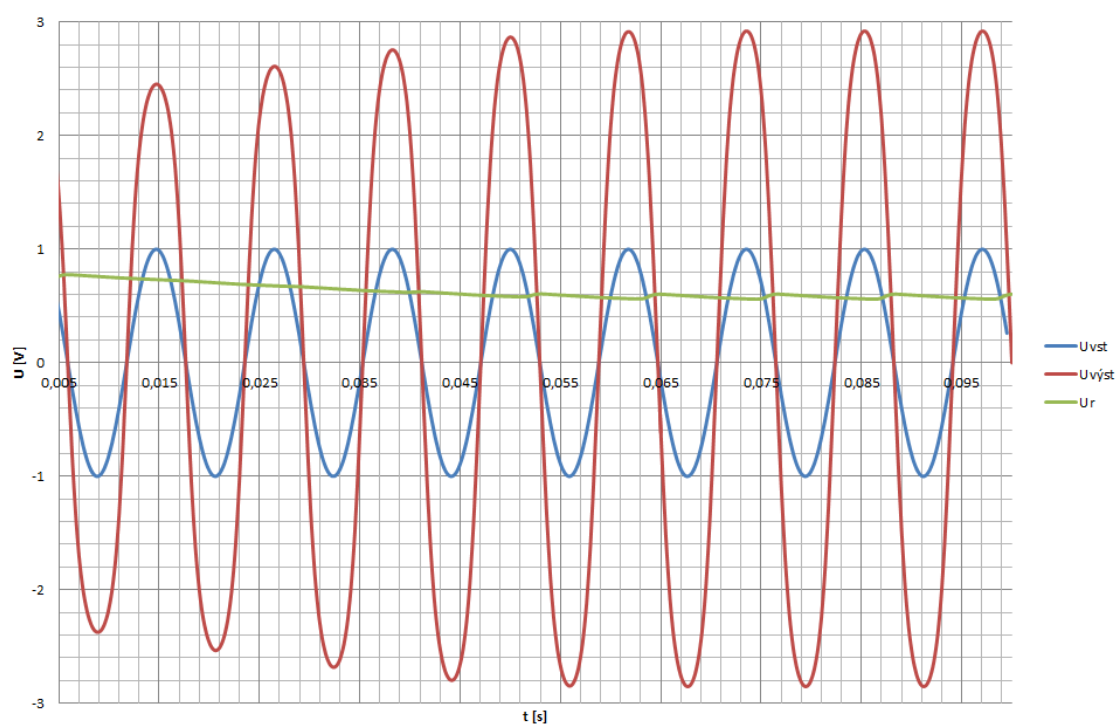
6 SIMULACE

Výsledná simulace byla provedena pomocí softwaru OrCAD Pspice 16.6 Lite. Na výsledném grafu simulace je vidět funkce reproduktorové ochrany, kdy vlivem řídicího napětí U_r dojde k limitaci výstupního signálu označeného červenou barvou. Při klesání hodnoty U_r naopak začne amplituda výstupního signálu narůstat.

Další ukázkou funkce řešení je převodní charakteristika 6.1, kde je vidět limitace výstupního signálu s narůstající hodnotou vstupního signálu U_{vst} .



Obr. 6.1: Převodní charakteristika pro frekvenci $f = 85$ Hz.

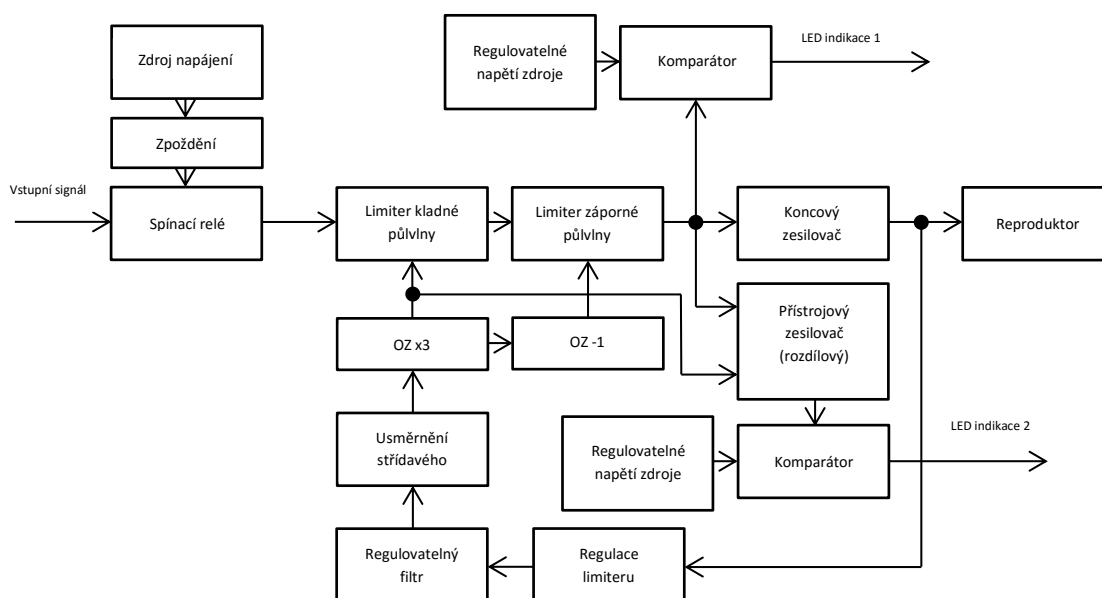


Obr. 6.2: Graf funkce pro $f = 85$ Hz

7 PRAKTICKÉ ŘEŠENÍ

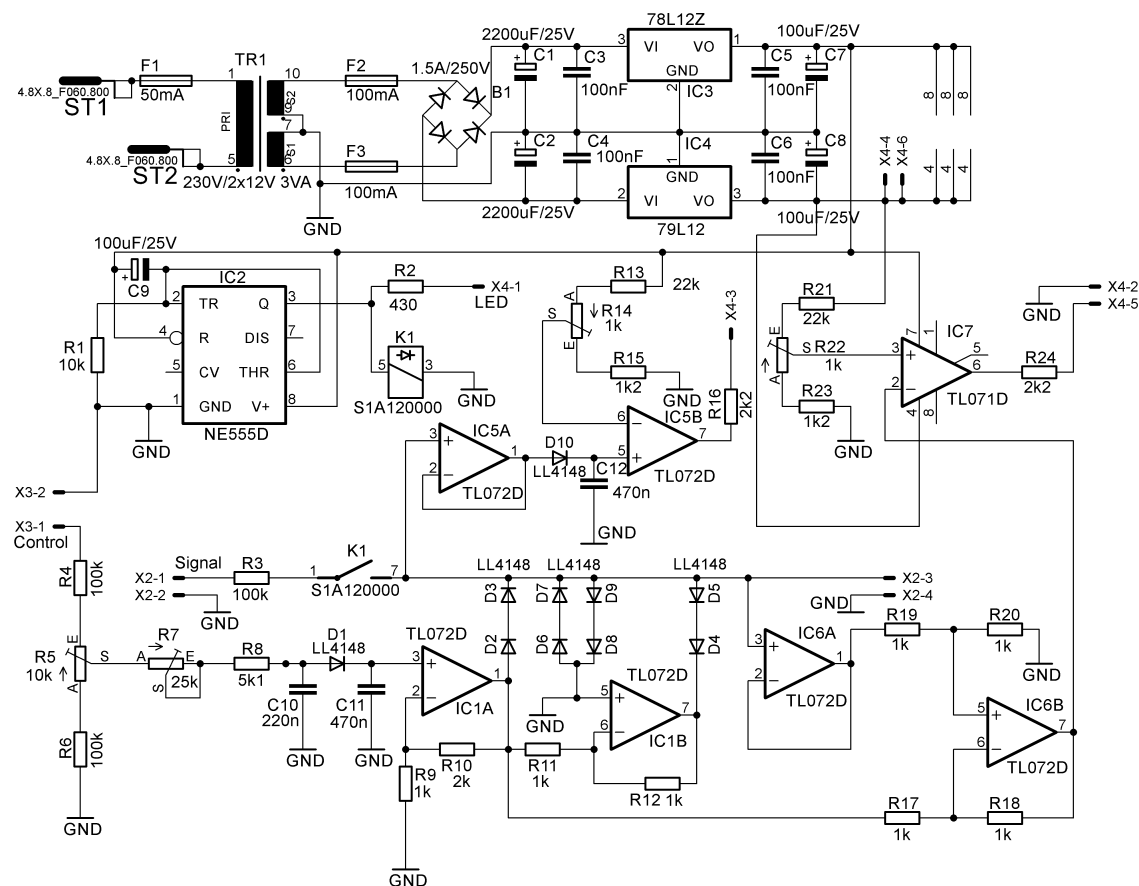
Praktické řešení je konstruováno na základě simulace zvoleného návrhu řešení problematiky. Celkové řešení lze rozdělit na tři části. Nejzásadnější je část samotného diodového limiteru. Pro celkovou kompaktnost a samostatnost zařízení je obvod doplněn o vlastní zdroj napájení a obvody pro optickou kontrolu limitace.

Samotné praktické řešení je trochu odlišné od teoretického návrhu 5.2, který byl simulován. Nejzásadnější změnou je použití trimrů tak, aby toto zapojení bylo co nejvíce variabilní pro využití k jinému zesilovači, reproduktorové skříňce nebo jen reproduktoru. Variabilnost se týká nastavení prahu limitace. Zařízení umožňuje nastavit vhodnou mezní frekvenci dolní propusti a zároveň velikost limitace, která je řízena zpětnou vazbou.



Obr. 7.1: Blokové schéma celého zařízení

7.1 Schéma zapojení



Obr. 7.2: Kompletní schéma zapojení

7.2 Popis zapojení

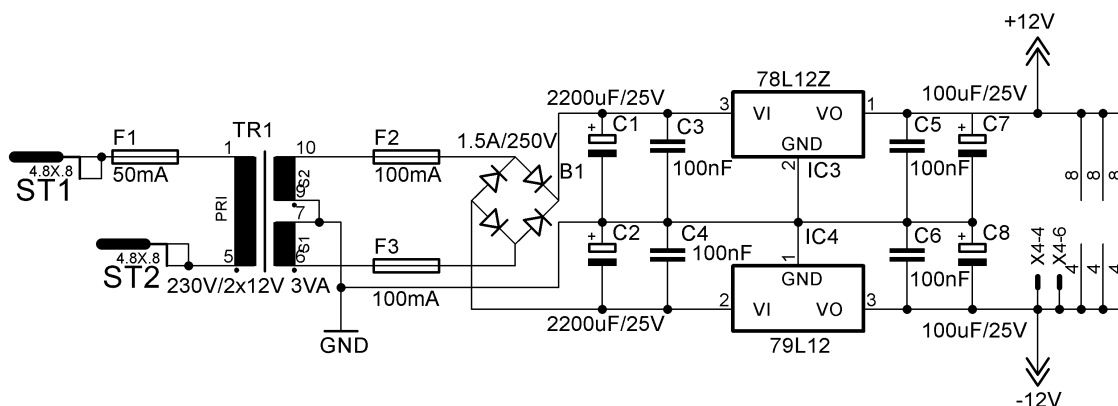
Popis zapojení je rozdělen do tří částí z důvodu větší přehlednosti zapojení. Nejdůležitější částí je zde obvod limiteru.

7.2.1 Napájecí zdroj

K obvodu je použit dvojitý napájecí zdroj. Jde o základní provedení zdroje s transformátorem. Zdroj má symetrický výstup +12 V a -12 V o proudu maximálně 100 mA [7].

Přívod je připojen do konektoru X1, za kterým je umístěná 50 mA pojistka, která je zároveň i hlavní pojistkou zařízení. Za síťovým transformátorem jsou zapojeny rovněž dvě pojistky 100 mA a za nimi 1 A můstkový usměrňovač. K vyhlazení

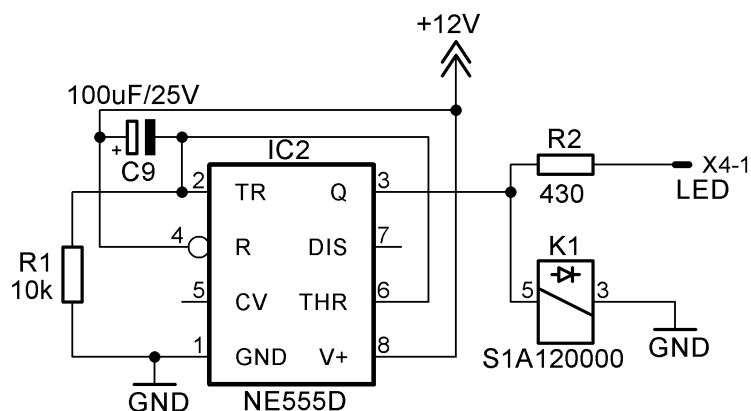
zvlněného napětí slouží kondenzátory $C1$ a $C2$. Dále následují stabilizátory kladného a záporného napětí 78L12 a 79L12, které mají co nejbliže k pouzdru umístěné blokové kondenzátory $C3$ až $C6$. Výstupní napětí slouží k napájení operačních zesilovačů a napájení LED indikace.



Obr. 7.3: Schéma zapojení napájecího zdroje

7.2.2 Zpoždovací linka

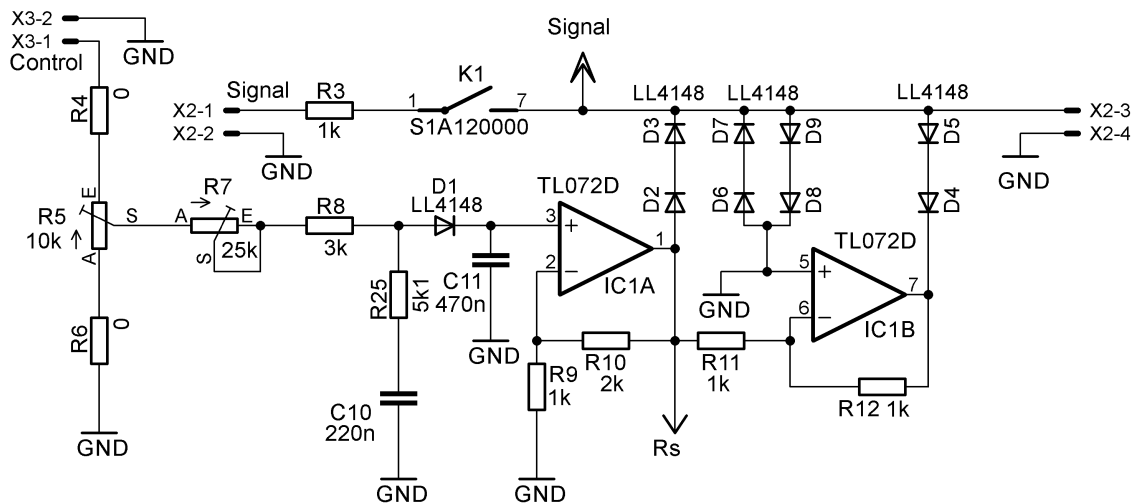
Do hlavní signálové větve je vloženo spínací relé $K1$. Relé je vloženo z důvodu sepnutí výstupu ochrany až po ustálení zdroje a tedy jistém napájení řídicího obvodu. Relé je ovládané napájecím zdrojem přes zpoždovací obvod, který tvoří známý časovač NE555 [9]. Délka prodlevy zapnutí je dána hodnotou rezistoru $R1$. Hodnota $R1$ je zvolena na 2 k Ω . Tato hodnota odpovídá přibližně 2 sekundám. Při sepnutí relé je rozsvícena zelená LED dioda s předřadným rezistorem $R2$.



Obr. 7.4: Schéma zapojení zpoždovací linky

7.2.3 Limiter

Popis funkce limiteru je popsán v kapitole 5.1.2. Od teoretického návrhu 5.2 se výsledné zapojení limiteru liší několika změnami. Dělič napětí tvořený rezistory $R1$ a $R2$ byl nahrazen variabilním děličem tvořeným rezistory $R4$, $R6$ a trimrem $R5$. To umožňuje nastavit hodnotu limitace na potřebnou hodnotu a následně ji přesně doladit. Ve výsledném zapojení jsou tyto hodnoty vypočítány pomocí vzorce 7.4. Pevně nastavený rezistor $R3$ z navrhovaného schématu byl nahrazen trimrem $R7$ a rezistorem $R8$. Spolu tvoří rozmezí nastavení mezní hodnoty RC článku. Společně s tím byla navýšena kapacita kondenzátoru $C3$ ($C10$) tak, aby zůstala zachována časová konstanta podle vzorce 5.1.1. Další změnou v obvodu je navýšení hodnoty rezistoru ve zpětné vazbě $IC1A$ pro větší zesílení neinvertujícího zesilovače. Hodnota rezistoru $R9$ a $R10$ je vypočítána podle vzorce 7.1 tak, aby výsledné zesílení bylo 3. Poslední změnou je snížení počtu diod. Diody byly sníženy kvůli požadovanému malému rozptýlu napětí na maximální hodnotu 2 V.



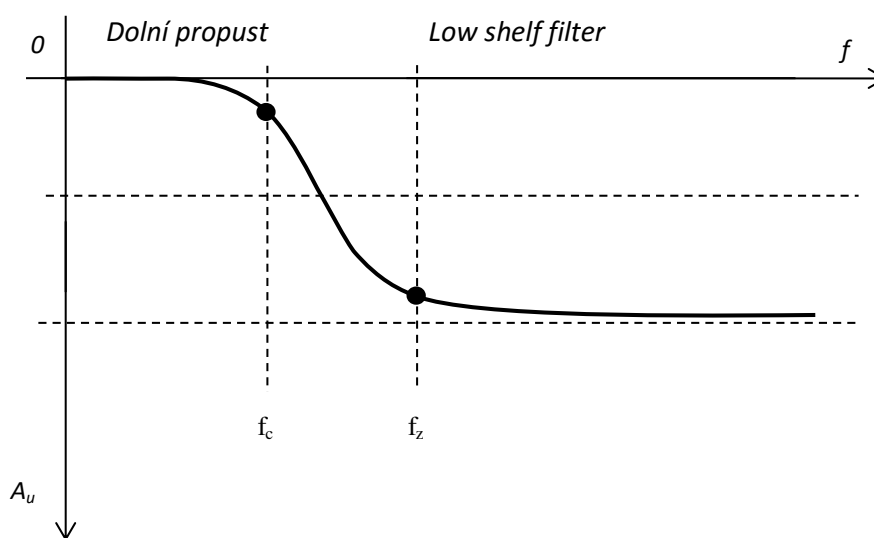
Obr. 7.5: Schéma zapojení limiteru

$$A_u = 1 + \frac{R_{ZP}}{R_1} = 1 + \frac{R_{10}}{R_9} \quad (7.1)$$

Limiter byl doplněn diodami $D6$ až $D9$ zapojenými proti zemi z důvodu dodatečné ochrany, aby nedošlo k nadměrnému přebuzení vlivem velkého vstupního signálu v případě, že by například z nějakého důvodu nemohla fungovat zpětná vazba. Tato limitace je v provozu i bez napájení operačních zesilovačů. Diody zároveň stanovují maximální vstupní signál, který bude limitován vlivem zpětné vazby.

Doplnění limiteru

Obvod limiteru byl doplněn o rezistor $R28$. Tento rezistor společně s kondenzátorem $C10$, rezistorem $R8$ a trimrem $R7$ tvoří low shelf filtr [8]. Tento filtr ve zpětné vazbě plní funkci limiteru v celém pásmu podle obrázku 7.6. Toto je vhodné řešení proti poškození cívky reproduktoru v pásmu, kde již nehrozí poškození reproduktoru vlivem velké výchylky, ale překročením maximálního výkonu cívky.



Obr. 7.6: Charakteristika limiteru s doplněným rezistorem R28

Hodnoty mezních frekvencí filtru jsou vypočítány pomocí vzorců 7.2 a 7.3 [8].

$$f_c = \frac{1}{2\pi C10(R7 + R8 + R25)} \quad (7.2)$$

$$f_z = \frac{1}{2\pi C10R25} \quad (7.3)$$

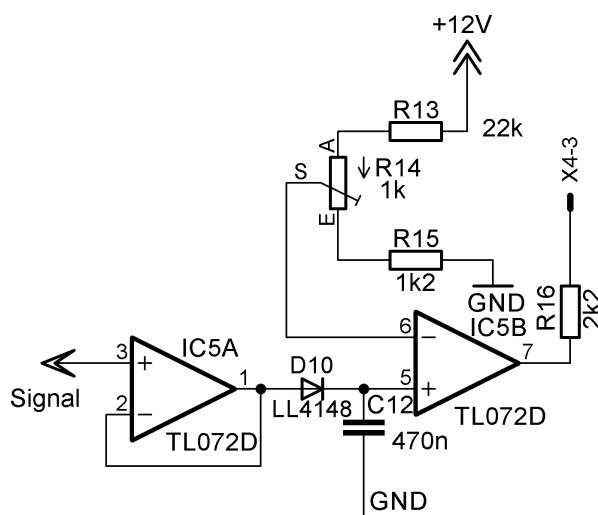
Po dosazení hodnot do vzorců dostaneme:

$$f_c = \frac{1}{2\pi C10(R7 + R8 + R25)} = \frac{1}{2\pi \cdot 220 \cdot 10^{-9} \cdot ((28 + 3 + 5,1)10^3)} = 84Hz$$

$$f_z = \frac{1}{2\pi C10R25} = \frac{1}{2\pi \cdot 220 \cdot 10^{-9} \cdot 5,1 \cdot 10^3} = 142Hz$$

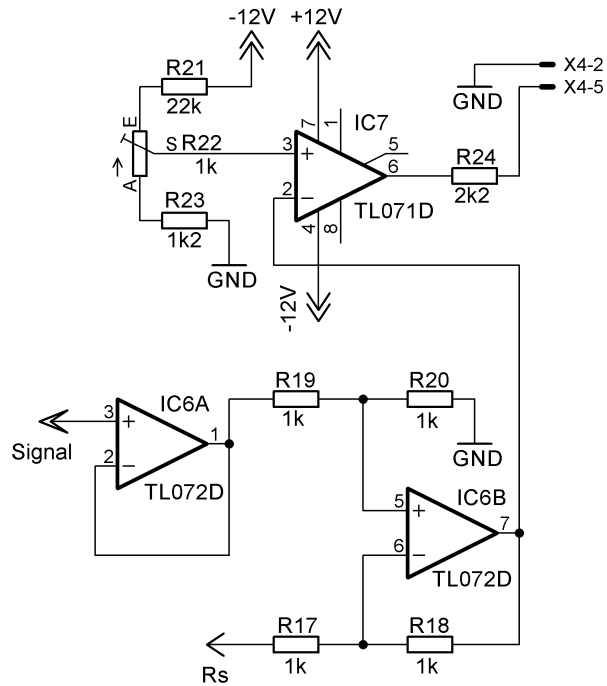
7.2.4 Indikace

Zařízení je doplněno dvěma obvody pro indikaci limitace. První obvod tvořený *IC5A* a *IC5B* slouží pro indikaci překročení vstupního signálu do obvodu nezávisle na výstupu. Vstupní signál je oddělen obvodem *IC1A*, aby nedocházelo následným zpracováním k zatěžování vstupního signálu. Signál je dále usměrněn před *D10* a vyhlazen pomocí *C12*. *IC5B* slouží jako komparátor napětí, kde dochází k porovnávání referenčního napětí s usměrněným signálem. Referenční napětí je tvořeno napájecím napětím, které je sníženo přes rezistory *R13*, *R15* a trimr *R14*. Pro tento obvod je hodnota nastavena na 0,6 V. Pokud tedy vstupní signál překročí tuto hodnotu, bude rozsvícena LED 2.



Obr. 7.7: Schéma zapojení indikace limitace vstupního signálu

Druhý obvod slouží k indikaci limitace, kdy dochází k limitaci vlivem signálu ze zpětné vazby. Indikuje tedy stav, kdy je překročena hraniční hodnota napětí na výstupu koncového zesilovače. Integrovaný obvod *IC6* je zapojen jako přístrojový zesilovač. Je to rozdílový zesilovač, který sleduje rozdíl napětí mezi *D2* a *D3*. *IC6A* slouží jako oddělení, aby signálová cesta nebyla zatěžována. Stejně jako v předchozím případě je zde komparátor napětí *IC7*, který porovnává hodnotu z přístrojového zesilovače s referenční hodnotou nastavenou rezistory *R21*, *R23* a trimrem *R22*. Prahová hodnota je předdimenzována a je v tomto případě nastavena na 1 V pro zápornou půlvlnu vstupního signálu. Pokud součet (rozdíl) napětí mezi sériově zapojenými diodami překročí hodnotu jejich prahového napětí v propustném směru, kdy začínají vést a dochází tedy k limitaci, je rozsvícena LED 3.



Obr. 7.8: Schéma zapojení indikace limitace výstupního signálu

Oba obvody jsou doplněny trimry s předřadnými rezistory na obou stranách trimrů pro variabilitnost nastavení současně s nastavením prahů limitace. Hodnoty rezistorů jsou vypočítány podle vzorce 7.4.

$$U_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * U_1 \quad (7.4)$$

8 KONSTRUKCE

Deska plošných spojů je navržena jako oboustranná, na které je osazeno kompletně celé zařízení včetně zdroje. Na straně TOP jsou osazeny drátové součástky, které zahrnují napájecí zdroj a trimry k řízení obvodu. Na straně BOTTOM je pak osazen v SMD součástkách samotný limiter a obvody pro indikaci limitace. Na desce plošných spojů jsou osazeny připojovací konektory se zámkem, které jsou propojeny pomocí kabelů se svorkami a konektory na čelní a zadní straně krabičky.

Celé zařízení je navrženo kompaktně do jedné přístrojové krabice. Zařízení je osazeno do hliníkové krabice HAMMOND U-HA1455N1201, která vyhovuje svými rozměry a zároveň je díky hliníkovému tělu velmi odolná a ideální pro přichycení svorek a konektorů. Zařízení je osazeno napájecím EURO konektorem společně s kolébkovým dvoupólovým vypínačem. Vstupní a výstupní signály jsou připojeny do nesympetrického vstupu (Jack 1/4") a do nesympetrického výstupu (Jack 1/4") na zadním panelu. Na zadním panelu jsou rovněž umístěny svorky pro přivedení řídicího signálu od svorek zesilovače nebo reproduktoru.

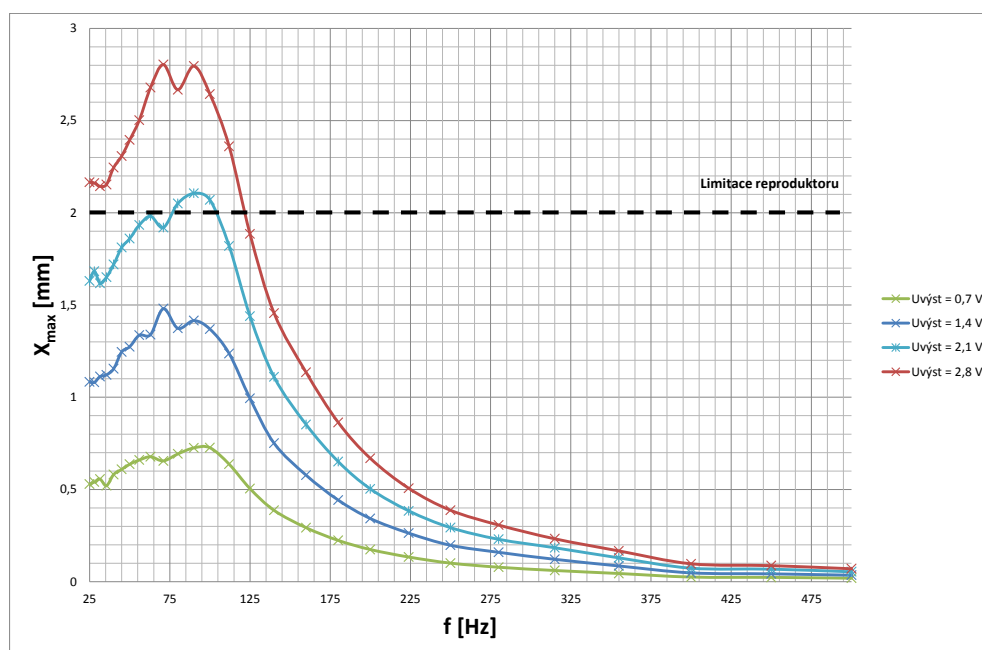
V přílohách jsou obsaženy technické výkresy pro úpravu frézováním a vrtáním předního a zadního panelu krabičky. Na přiloženém CD k této práci jsou soubory obsahující 3D modely přední a zadní strany s výkresem pro zhotovení popisků gravírováním.



Obr. 8.1: Finální provedení navrženého zařízení

9 NASTAVENÍ ZAŘÍZENÍ

Zařízení je připojeno do signálové cesty přímo před koncový zesilovač. Nejdůležitějším krokem je měření závislosti výchylky reproduktoru na frekvenci společně s hodnotou výstupního napětí koncového zesilovače. Měření těchto parametrů je popsáno v kapitole 4. Z důvodu změny reproduktoru v bezodrazovém měřicím boxu bylo provedeno nové měření. Z grafu je tedy patrné, že na frekvenci $f = 85$ Hz nesmí výstupní napětí zesilovače překročit hodnotu $U_{vst} = 2$ V. Vstupní signál nastavíme na nejvyšší možný. Zároveň s tím nastavíme i maximální zesílení koncového zesilovače. Pomocí voltmetru, připojenému paralelně k zátěži, nastavíme pomocí trimru $R7$ napětí na hodnotu 2 V. Při nahrazení umělé zátěže reproduktorem, reproduktor nepřekročí stanovenou maximální výchylku.



Obr. 9.1: Výsledné měření 5"reproduktoru VISATON FR 13

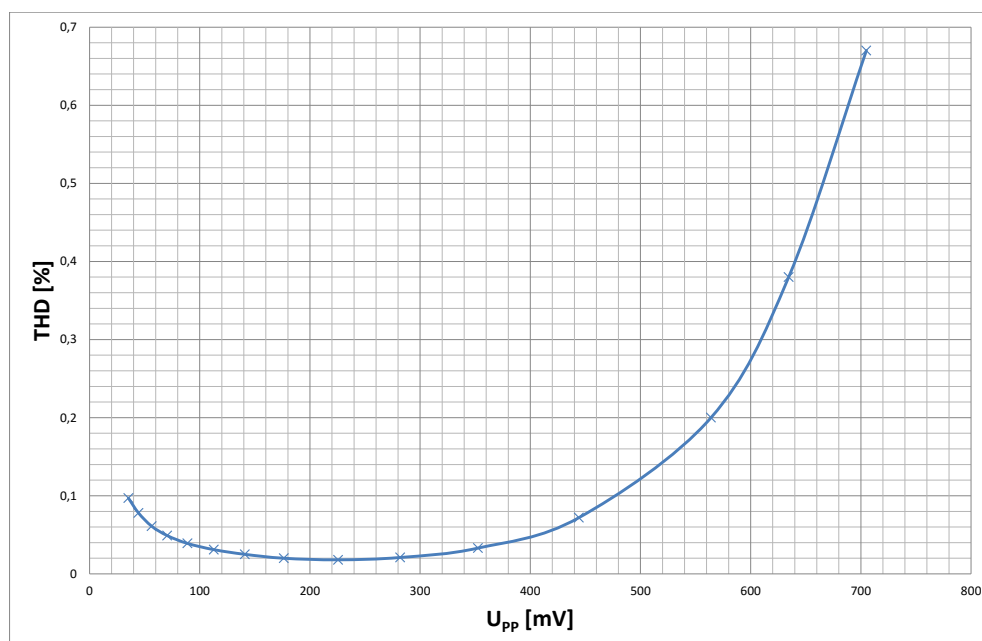
10 VÝSLEDNÉ PARAMETRY ZAŘÍZENÍ

Pro objektivní posouzení dosažených výsledků bylo využito experimentálního měření, které mimo jiné slouží pro individuální nastavení limiteru. V každém z těchto měření je použito jiné nastavení limitace pomocí trimrů $R5$ a $R7$ tak, aby byla lépe patrná funkce zařízení.

10.1 Elektrické parametry získané měřením

Vstupní impedance ($f = 1$ kHz, $U_{vst} = 500$ mV):

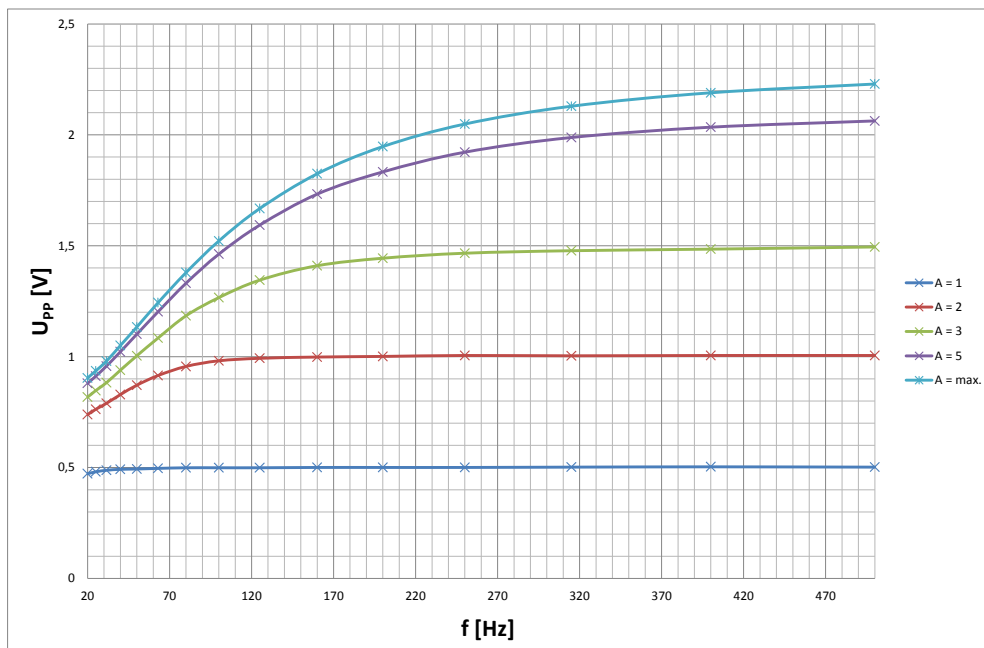
- $6,2$ k Ω



Obr. 10.1: Graf závislosti harmonického zkreslení na vstupním napětí pro $f = 1$ kHz

10.2 Funkce limiteru

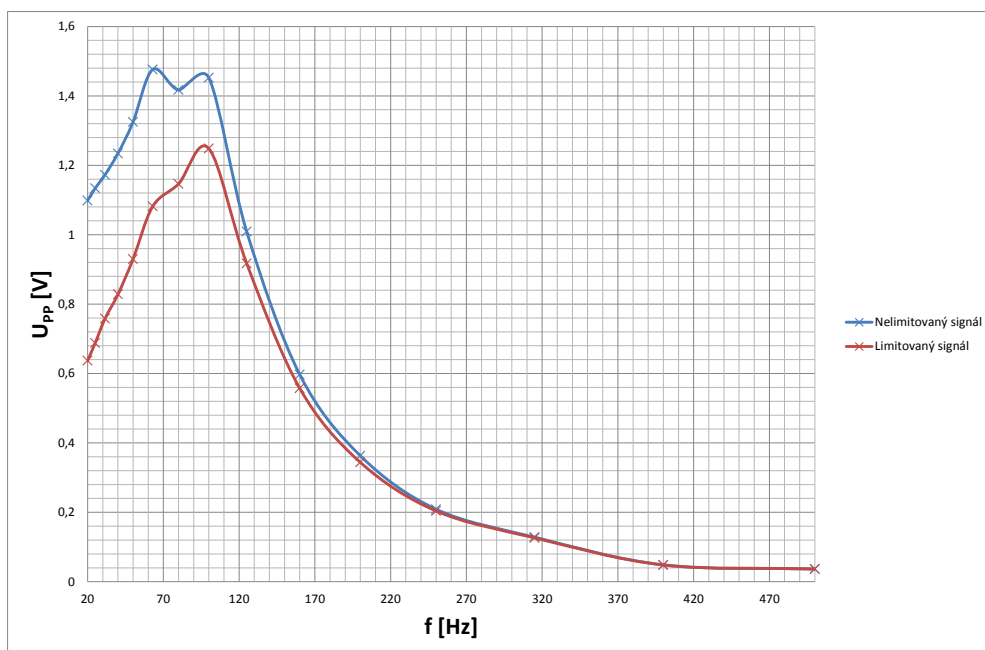
Graf měření 10.3 zobrazuje výchylku reproduktoru bez vloženého zařízení a s vloženým zařízením do vstupu koncového zesilovače. Z grafu je vidět snížení výchylky reproduktoru po vložení zařízení do signálové cesty.



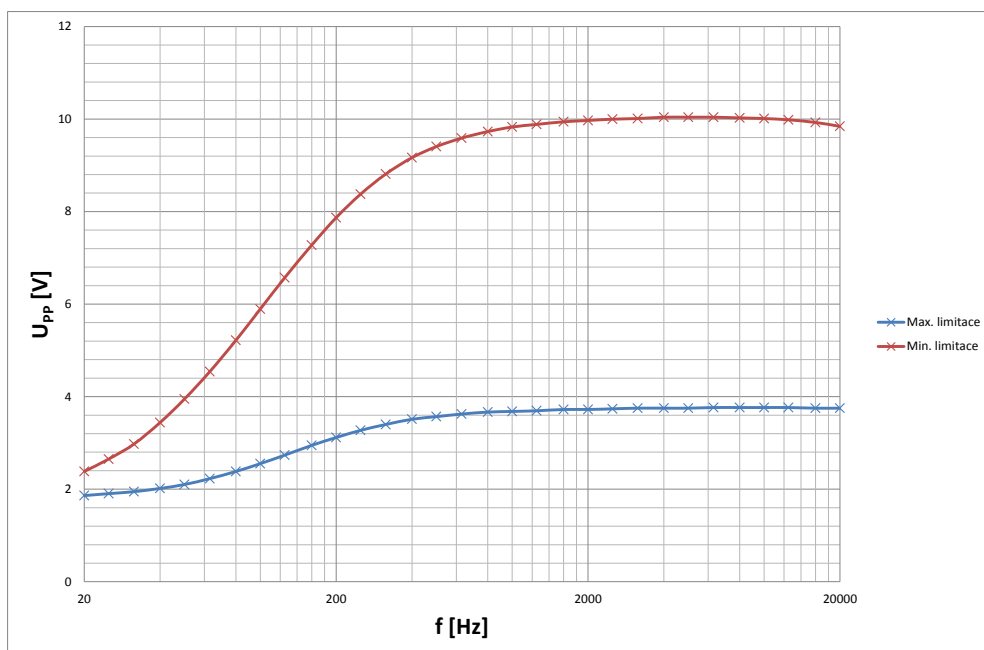
Obr. 10.2: Závislosti amplitudy výstupního signálu na amplitudě vstupního signálu při různých frekvencích a různých zesíleních koncového zesilovače

10.3 Funkce filtru zpětné vazby

Z grafu 10.4 je patrné omezování výstupního napětí i na vysokých kmitočtech. Měření je provedeno za extrémních podmínek, kdy $U_{vst} = 10$ V a zesílení koncového zesilovače je na maximální hodnotě. Dále je pak v grafu vynesena rozsah nastavení limitace pomocí trimru $R5$.



Obr. 10.3: Graf závislosti výchylky na frekvenci pro limitovaný a nelimitovaný signál



Obr. 10.4: Graf závislosti výstupního napětí na frekvenci pro extrémní podmínky

11 ZÁVĚR

V práci jsem se zabýval problematikou výchylky reproduktoru při nízkých kmitočtech, jejím vlivem na zkreslení přeneseného signálu reproduktorem a nejdůležitějším parazitním jevem, a to mechanickým poškozením reproduktoru. Práce je koncipována jako postup pro návrh a ideální zvolení příslušné ochrany proti překročení výchylky. Zadání je z velké části zpracováno pro obecné použití, jelikož předpoklad velké výchylky reproduktoru na nízkých kmitočtech platí všeobecně.

V první části je popsána problematika výchylky, s ní spojené parametry reproduktoru a vliv prostředí na chování reproduktoru. Navazuje na to příklad měření výchylky. Tímto konkrétním měřením jsem zjistil chování reproduktoru v závislosti na budícím napětí reproduktoru, jež se jevilo jako jediná možná veličina pro řízení regulace obvodu. Výsledný návrh byl zvolen pro svou jednoduchost a možnost nejlepšího individuálního nastavení pouhou změnou hodnot rezistorů v obvodu. Návrh se tudíž stává univerzálním.

Na základě simulace a odzkoušení obvodu vznikl obvod s drobnými úpravami. Malá odlišnost zapojení mezi simulací a výsledným návrhem je způsobena použitím reálných obvodových prvků a hlavně variabilitou obvodu. K simulovanému návrhu byl přidán vlastní napájecí zdroj a obvody pro indikaci práce limiteru.

K obvodu bylo navrženo i konstrukční řešení včetně popisu a seznamu potřebných součástí. V práci jsou obsaženy technické výkresy na úpravu přístrojové krabičky. K úpravě přístrojové krabičky byli rovněž navrženy 3D modely na výrobu popisků formu gravírování, které jsou obsaženy na přiloženém CD.

Součástí práce není návrh koncového zesilovače z důvodu použití externího zesilovače Alesis RA 150, který je součástí laboratorní úlohy. Toto řešení je velkou výhodou pro univerzální použití ochrany. Lze tedy připojit k jakémukoliv zesilovači a s možností doladění ochrany a indikace limitace pomocí trimrů a jejich předřadných rezistorů.

LITERATURA

- [1] SCHIMMEL, Jiří. *Elektroakustika: skriptum*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. ISBN 978-80-214-4716-5
- [2] Repromania.net. *Teorie*, [cit. 20. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.repromania.net/teorie/>>.
- [3] SUCHÁNEK, Tomáš. *Bakalářská práce*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2009. 44s.
- [4] SVOBODA, Ladislav. *Reproduktory a reproduktorové soustavy*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985. 278 s. *Kniha*, [cit. 20. 5. 2016].
- [5] LUKEŠ, Jaroslav. *Věrný zvuk. První vydání*. Praha : Státní Nakladatelství technické literatury, 1962. 325 s. *Kniha*, [cit. 20. 5. 2016].
- [6] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy, 1 díl*. Karviná : DEXON, 2001. 211 s. *Kniha*, [cit. 20. 5. 2016].
- [7] pavouk.org. *Zdroj*, [cit. 20. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://http://www.pavouk.org/hw/dualpowersupply/index.html>>.
- [8] LINKWITZ LAB. *Linkwitz lab*, [cit. 20. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.linkwitzlab.com/filters.htm>>.
- [9] Electronic hotspot. *E-Hotspot*, [cit. 20. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://myelectronicshub.blogspot.cz/>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

X_{lim}	Maximální výchylka reproduktoru - zkreslení
X_{max}	Maximální výchylka reproduktoru - mechanické poškození
f	Frekvence
f_c	Mezní frekvence
A	amplituda napětí signálu z měřiče rychlosti
t	čas
Q	Činitel jakosti filtru
C	Kapacita kondenzátoru
R	Velikost odporu
$U_{výst}$	Vstupní napětí reproduktoru
U_{vst}	Napětí vstupního signálu
RC	Filtr tvořený kombinací rezistoru a kondenzátoru
D	Dioda

SEZNAM PŘÍLOH

A	Tabulky naměřených hodnot	51
A.1	Naměřené hodnoty pro simulaci	51
B	Graf simulace	54
C	Deska plošných spojů	55
C.1	Návrh motivu plošného spoje	55
C.1.1	DPS celého obvodu - strana spojů (top)	55
C.1.2	DPS celého obvodu - strana spojů (bottom)	56
C.2	Osazovací výkresy	57
C.2.1	Osazení obvodu - strana spojů (top)	57
C.2.2	Osazení obvodu - strana spojů (bottom)	58
C.3	Seznam součástek	59
D	Fotodokumentace	63
D.1	Finální provedení navrženého zařízení	63
E	Obsah přiloženého CD	65
F	Technické výkresy	66

A TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT

A.1 Naměřené hodnoty pro simulaci

Změřené hodnoty, které byly použity pro návrh obvodu a simulaci.

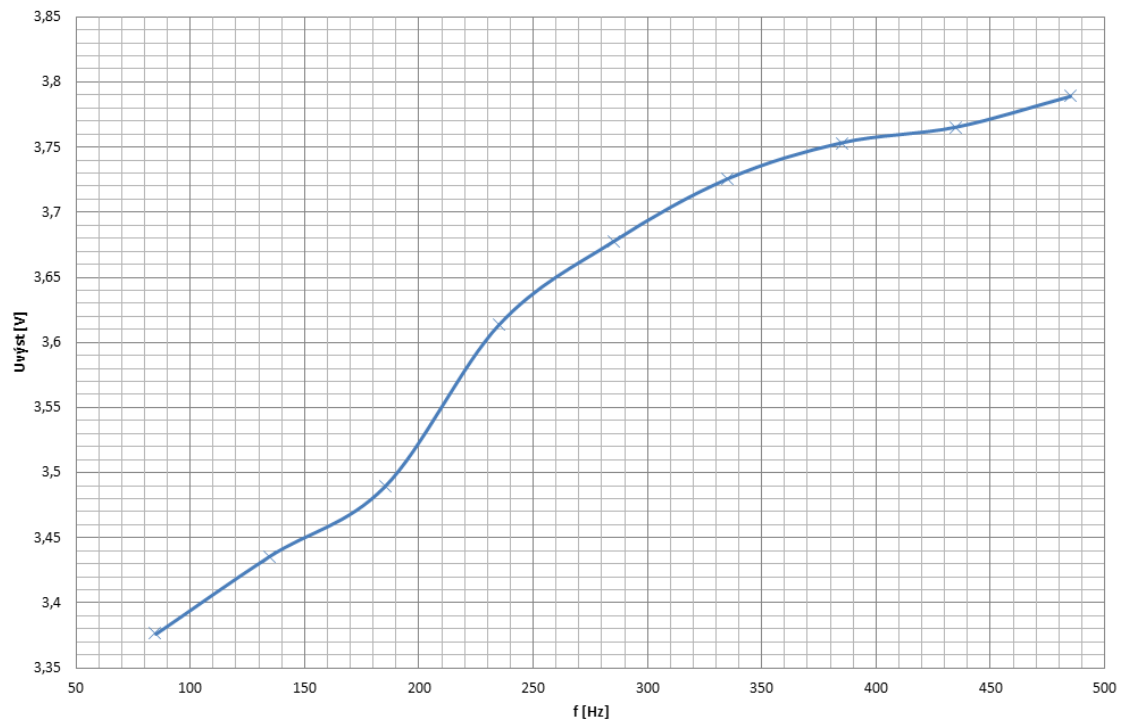
U_{vst} [V]	1	2	3	4	5	6
f [Hz]	U_v [V]					
25	0.94	1.92	2.96	3.84	4.5	5.3
28	1.1	2.2	3.28	4.2	5	6
31.5	1.25	2.48	3.7	4.7	5.6	6.7
35.5	1.4	2.8	4.1	5.3	6.2	7.34
40	1.6	3.16	4.6	5.8	7.4	8
45	1.8	3.3	5.2	6.48	8.2	8.8
50	1.72	3.48	5.28	7.2	8.8	10
56	1.92	4	5.92	8.6	9.8	11
63	2.16	4.6	6.64	9.4	11	11
71	2.36	4.9	7.2	10.2	11.6	11
80	2.48	5.2	7.44	10.6	11.6	11
90	2.72	5.52	8.6	11.2	11.6	11
100	2.92	5.76	8.89	11.4	11.6	11
112	3	5.84	8.8	11.2	11.4	11
125	2.88	5.68	8.6	10.8	11	11
140	2.72	5.28	8	10.2	11.2	11
160	2.52	4.96	7.4	9.4	11	11
180	2.32	4.64	7	8.6	10.2	11
200	2.08	4.16	5.9	8	9.4	10.4
224	1.8	3.6	5.2	6.6	8.2	9.4
250	1.64	3.36	4.8	6.1	7.8	8.8
280	1.56	3.2	4.5	5.6	7.6	8
315	1.08	2.16	3	3.84	4.8	5.4
355	0.92	1.92	2.8	3.52	4.6	5
400	0.88	1.76	2.36	3.2	4.4	4.6
450	0.72	1.6	2.12	2.88	3.6	4
500	0.68	1.44	1.8	2.64	3	3.8

Tab. A.1: Hodnoty výchyly vyjádřené amplitudou napětí z laserového měřiče

Uvst [V]	1	2	3	4	5	6
f [Hz]	Xlim [mm]					
25	0.60	1.22	1.89	2.45	2.87	3.38
28	0.63	1.25	1.87	2.39	2.84	3.41
31.5	0.63	1.25	1.87	2.38	2.83	3.39
35.5	0.63	1.26	1.84	2.38	2.78	3.29
40	0.64	1.26	1.85	2.31	2.95	3.18
45	0.64	1.17	1.84	2.29	2.90	3.11
50	0.55	1.11	1.68	2.29	2.80	3.18
56	0.55	1.14	1.68	2.45	2.79	3.13
63	0.55	1.15	1.68	2.38	2.78	2.78
71	0.53	1.10	1.61	2.29	2.60	2.47
80	0.49	1.04	1.48	2.11	2.31	2.19
90	0.48	0.98	1.52	1.98	2.05	1.95
100	0.46	0.92	1.41	1.82	1.85	1.75
112	0.43	0.83	1.25	1.59	1.62	1.56
125	0.37	0.72	1.10	1.38	1.40	1.40
140	0.31	0.60	0.91	1.16	1.27	1.25
160	0.25	0.49	0.74	0.94	1.09	1.09
180	0.21	0.41	0.62	0.76	0.90	0.97
200	0.17	0.33	0.47	0.64	0.75	0.83
224	0.13	0.26	0.37	0.47	0.58	0.67
250	0.10	0.21	0.31	0.39	0.50	0.56
280	0.09	0.18	0.26	0.32	0.43	0.45
315	0.05	0.11	0.15	0.19	0.24	0.27
355	0.04	0.09	0.13	0.16	0.21	0.22
400	0.04	0.07	0.09	0.13	0.18	0.18
450	0.03	0.06	0.08	0.10	0.13	0.14
500	0.02	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12

Tab. A.2: Hodnoty výchylky X_{max}

B GRAF SIMULACE

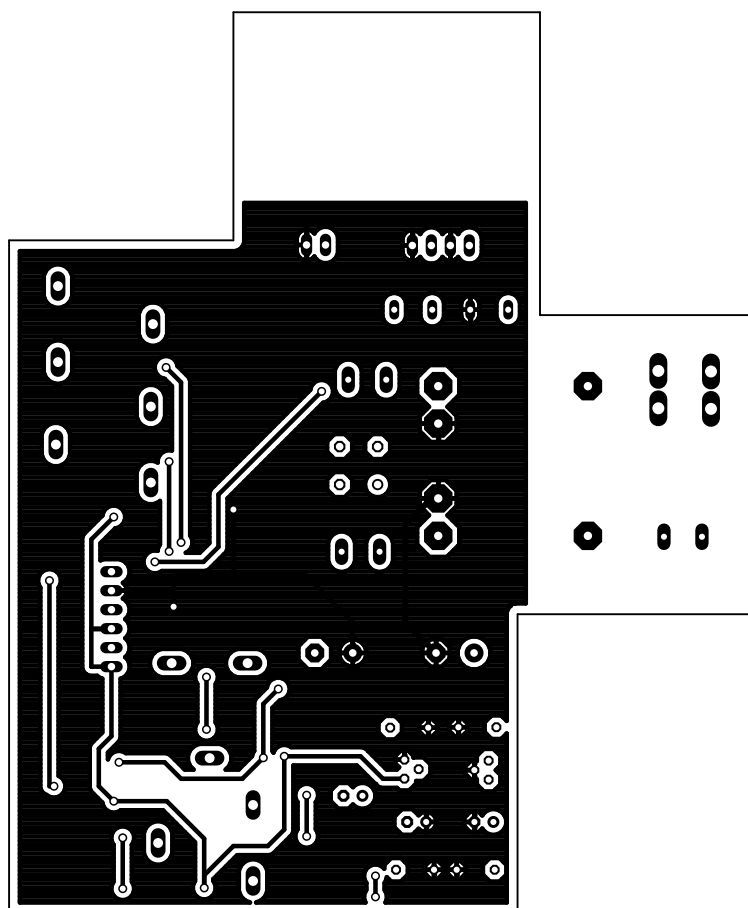


Obr. B.1: Graf závislosti výstupního napětí na frekvenci při limitaci

C DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ

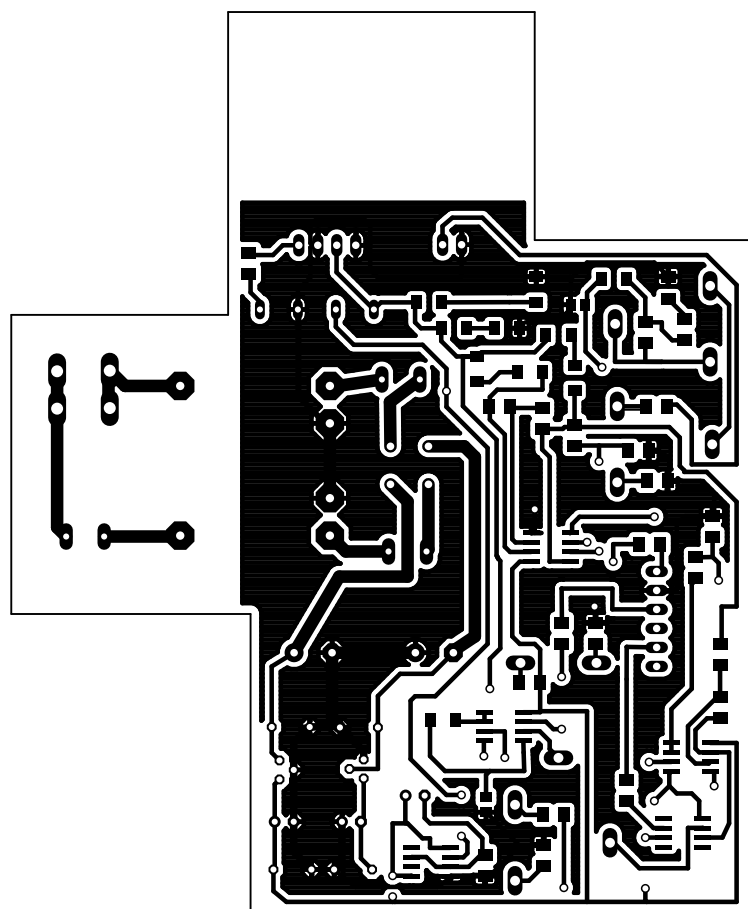
C.1 Návrh motivu plošného spoje

C.1.1 DPS celého obvodu - strana spojů (top)



Rozměr desky 100,0 x 120,0 [mm], měřítko M1:1

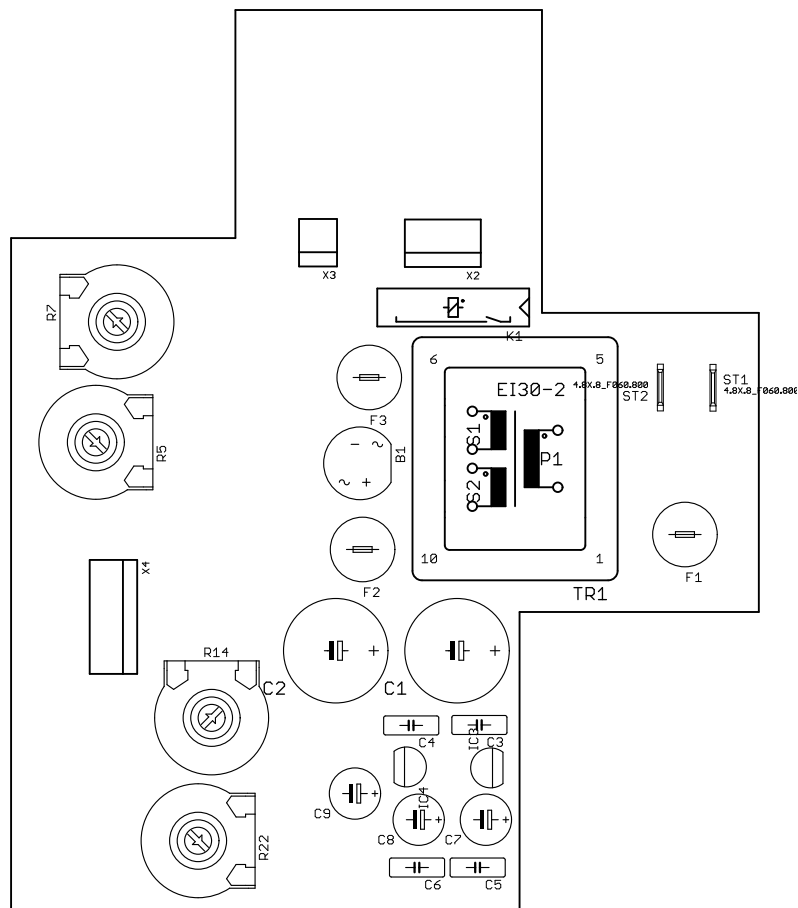
C.1.2 DPS celého obvodu - strana spojů (bottom)



Rozměr desky 100,0 x 120,0 [mm], měřítko M1:1

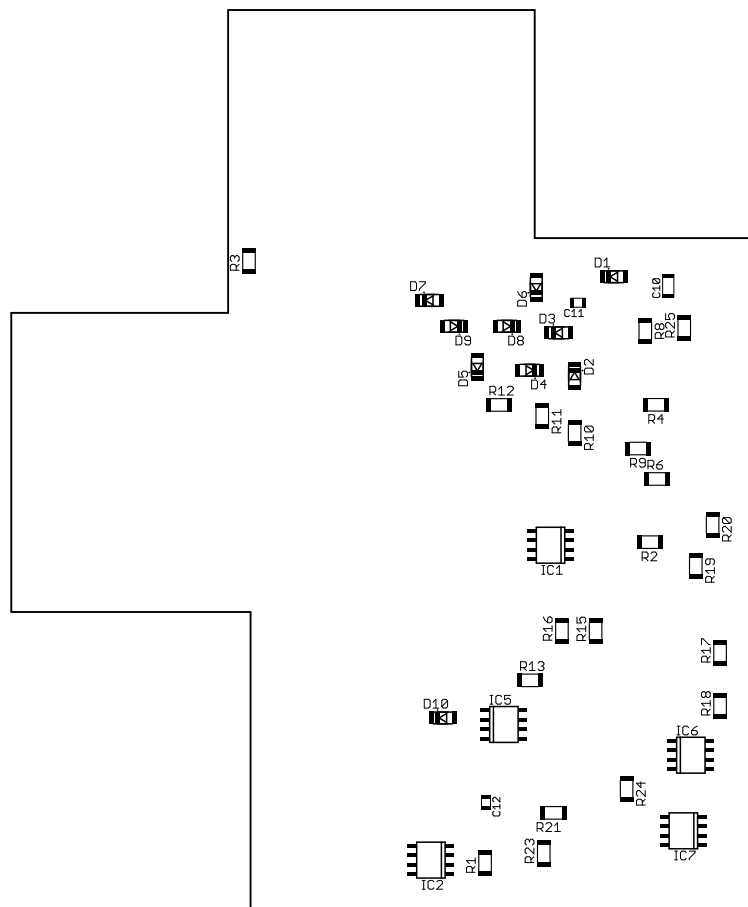
C.2 Osazovací výkresy

C.2.1 Osazení obvodu - strana spojů (top)



Rozměr desky 100,0 x 120,0 [mm], měřítko M1:1

C.2.2 Osazení obvodu - strana spojů (bottom)



Rozměr desky 100,0 x 120,0 [mm], měřítko M1:1

C.3 Seznam součástí

Seznam součástí obsahuje nejen součástky obvodu, ale také konstrukční díly pro vestavění obvodu do přístrojové krabičky.

Označení	Hodnota	Typ	Rozteč/ pouzdro
B1	1.5A/250V		RB1A
C1	2200uF/25V		E5-13
C2	2200uF/25V		E5-13
C3	100nF		C050-025X075
C4	100nF		C050-025X075
C5	100nF		C050-025X075
C6	100nF		C050-025X075
C7	100uF/25V		E2,5-7
C8	100uF/25V		E2,5-7
C9	100uF/25V		E2,5-7
C10	220n		C1206K
C11	470n		C0805K
C12	470n		C0805K
D1	LL4148		SOD80_DO213AA_MINIMELF
D2	LL4148		SOD80_DO213AA_MINIMELF
D3	LL4148		SOD80_DO213AA_MINIMELF
D4	LL4148		SOD80_DO213AA_MINIMELF
D5	LL4148		SOD80_DO213AA_MINIMELF
D6	LL4148		SOD80_DO213AA_MINIMELF
D7	LL4148		SOD80_DO213AA_MINIMELF
D8	LL4148		SOD80_DO213AA_MINIMELF
D9	LL4148		SOD80_DO213AA_MINIMELF
D10	LL4148		SOD80_DO213AA_MINIMELF
F1	50mA		TR5
F2	100mA		TR5
F3	100mA		TR5
IC1	TL072D		SO08
IC2	NE555D		SO08
IC3	78L12Z		TO92
IC4	79L12		TO92
IC5	TL072D		SO08
IC6	TL072D		SO08
IC7	TL071D		SO08
K1	S1A120000		REED

Označení	Hodnota	Typ	Rozteč/ pouzdro
R1	10k		M1206
R2	430		M1206
R3	1k		M1206
R4	0		M1206
R5	10k		LI15
R6	0		M1206
R7	25k		LI15
R8	3k		M1206
R9	1k		M1206
R10	2k		M1206
R11	1k		M1206
R12	1k		M1206
R13	22k		M1206
R14	1k		LI15
R15	1k2		M1206
R16	2k2		M1206
R17	1k		M1206
R18	1k		M1206
R19	1k		M1206
R20	1k		M1206
R21	22k		M1206
R22	1k		LI15
R23	1k2		M1206
R24	2k2		M1206
R25	5k1		M1206
ST1	4.8X.8		F060.800
ST2	4.8X.8		F060.800
TR1	230V/2x12V		EI30-2
X2	Signal		22-23-2041
X3	Control		22-23-2021
X4	LED		22-23-2061

Označení	Typ	Rozměry	Popis
Skříň	HAMMOND U-HA1455N1201	53 x 103 x 125 mm	Hliníková krabička
AC vypínač	P-H8550VB01	15 x 21	Kolébkový spínač do panelu s aretací 2-pólový spínací ON-OFF
AC konektor	SCHURTER 6100.3100	-	Síťový napájecí EURO konektor, přímá vidlice
Faston konektory	Mosazný 9x	4,8 x 8 mm	Faston na kabel
Krytka	64832-F NICHIFU	-	Krytka na faston
Očko	RL04470 3x	3,2mm	Kabelové očko
Jack konektor	K 357 2x	Jack 1/4"	Mono
Konektor se zámkem	PFH02-02P	2,54 mm	Na kabel
Konektor se zámkem	PFH02-04P	2,54 mm	Na kabel
Konektor se zámkem	PFH02-06P	2,54 mm	Na kabel
Kontakt	PFF02-01FG TAPE 12x	-	Zlacené
Panelová zdířka	K206	4 mm	černá/červená, počet kontaktů 2
-	Bužírka vinutá		
-	Spojovací materiál		
-	Propojovací vodiče		

D FOTODOKUMENTACE

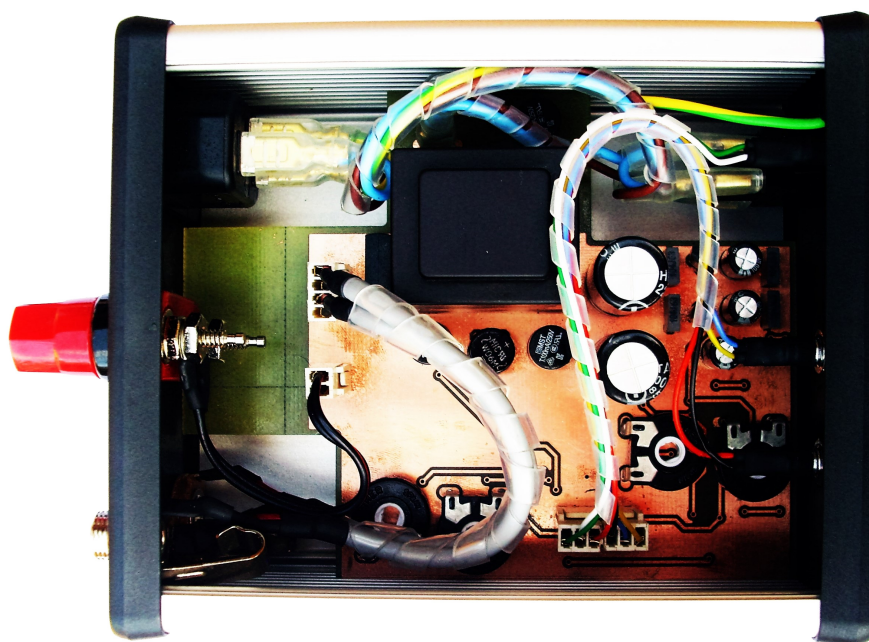
D.1 Finální provedení navrženého zařízení



Obr. D.1: Čelní pohled na přístrojovou skříň



Obr. D.2: Zadní pohled na přístrojovou skříň



Obr. D.3: Vnitřní pohled do přístrojové skříňě

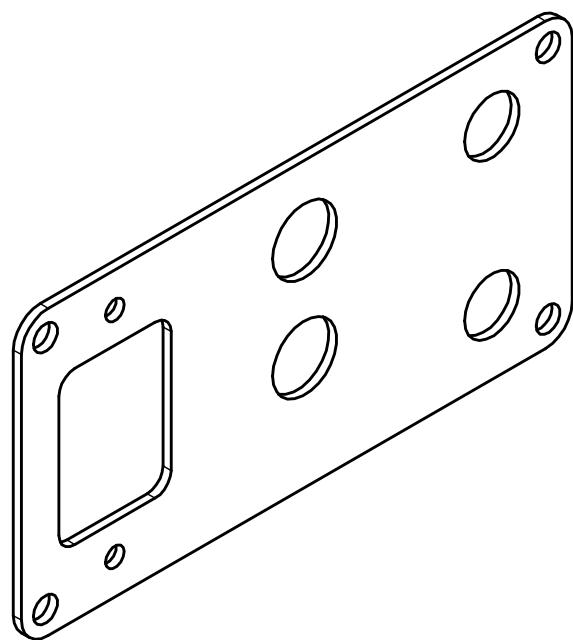
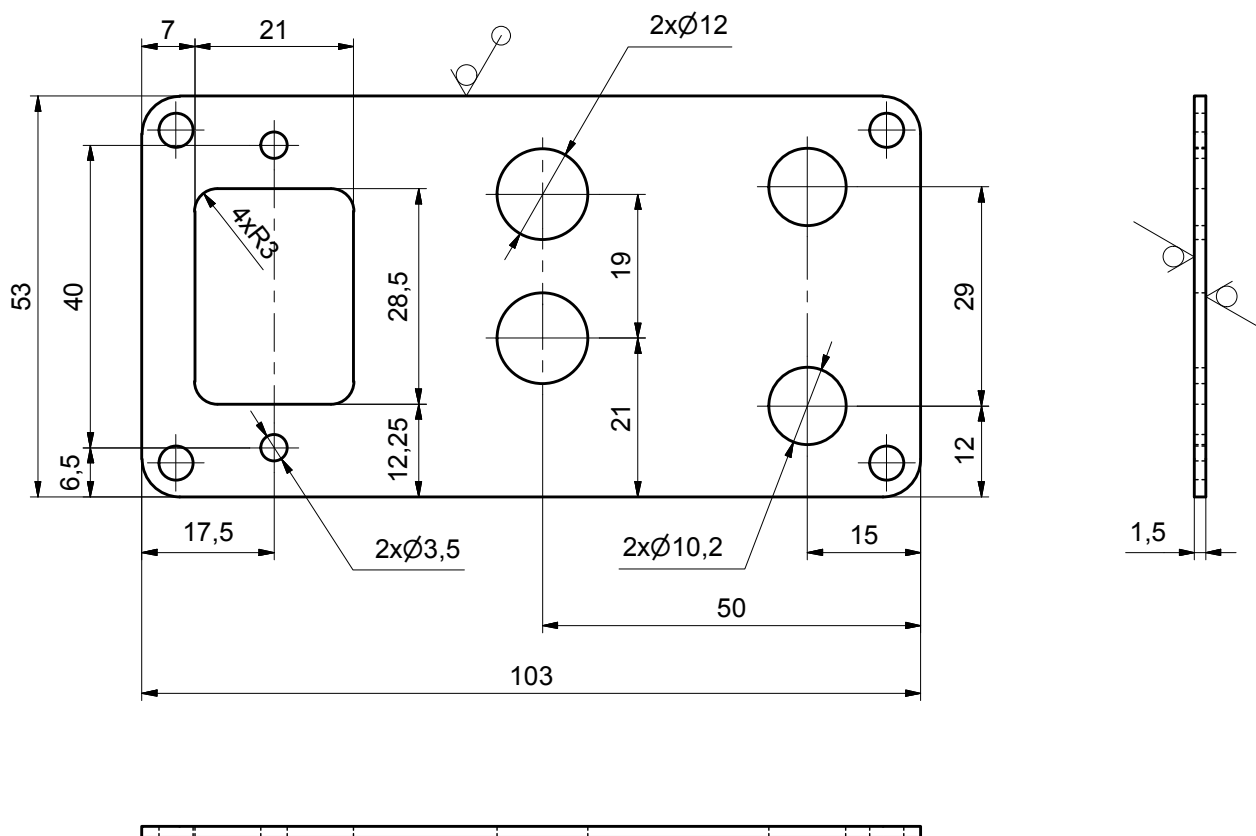
E OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

CD Bakalářská práce - Libor Příbyl

- Hlavní dokument BP ve formátu pdf
- Výrobní podklady DPS ve formátu Eagle 6.6.0
- Výrobní podklady pro gravírování
- Technické výkresy ve formátu pdf

F TECHNICKÉ VÝKRESY

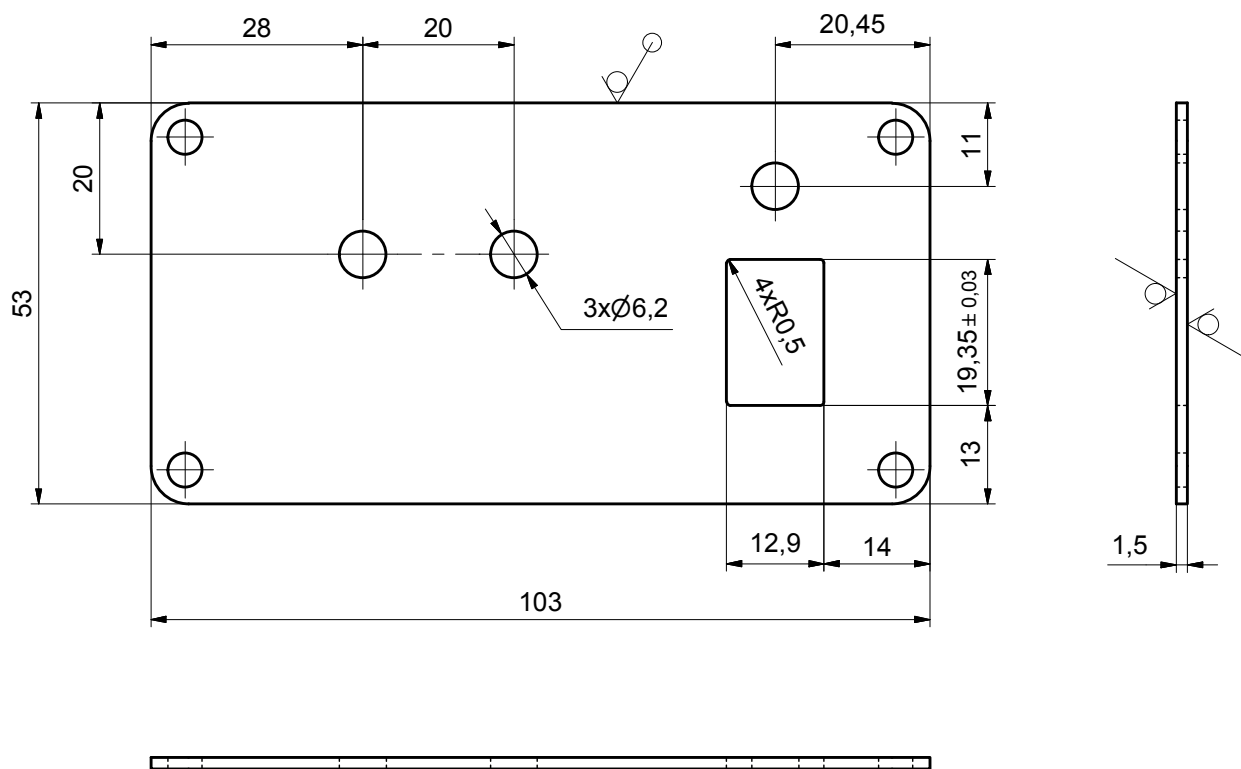
Technické výkresy pro úpravu hliníkové přístrojové krabičky HAMMOND U-HA1455N1201.
Výkresy jsou v elektronické podobě přiloženy na CD ve formátu pdf.



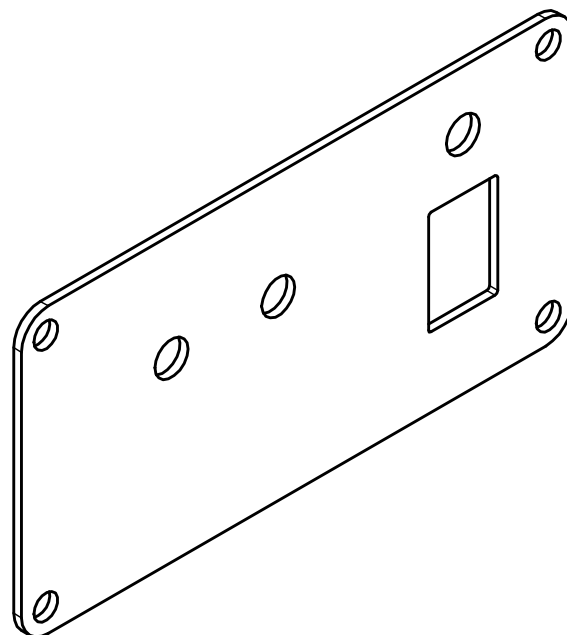
K VÝKRESU JE DODÁN POLOTOVAR
VŠECHNY OTVORY ODJEHLIT

Materiál	HLINÍK	Povrchová úprava	ELOX
Rozměr polot.	P1,5-103x53	Ochrana dat dle	ISO 16016
Kreslil	Příbyl Libor	Tolerance dle	ISO 2768-mK
		Datum	20.4.2016
		Jakost povrchu	ISO 1302-Ra

	Název	ZADNÍ STRANA	
	Měřítko 1 : 1	Číslo výkresu	
	Hmotnost 0,018 kg	List / Počet listů: 1 / 1	



K VÝKRESU JE DODÁN POLOTOVAR
VŠECHNY OTVORY ODJEHLIT



Materiál	HLINÍK	Povrchová úprava	ELOX
Rozměr polot.	P1,5-103x53	Ochrana dat dle	ISO 16016
Kreslil	Příbyl Libor	Tolerance dle	ISO 2768-mK
		Datum	20.4.2016
		Jakost povrchu	ISO 1302-Ra

	Název	PŘEDNÍ STRANA	
Měřítko 1 : 1		Číslo výkresu	
Hmotnost 0,020 kg		List / Počet listů: 1 / 1	(APSO -)