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

ZPŮSOBY IMPEDANČNÍHO PŘIZPŮSOBENÍ ZDROJŮ AKUSTICKÉHO SIGNÁLU PŘI JEJICH NÁSLEDNÉM ZPRACOVÁNÍ

METHODS OF ACOUSTIC SIGNAL SOURCES IMPEDANCE MATCHING FOR THEIR FURTHER PROCESSING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Nikola Havelková

AUTHOR

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**

specializace Zvuková produkce a nahrávání

Ústav telekomunikací

Studentka: Nikola Havelková ***ID:*** 203727

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Způsoby impedančního přizpůsobení zdrojů akustického signálu při jejich následném zpracování

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku tzv. DI boxů využívaných v audio technice. Kriticky zhodnoťte výhody a nevýhody jejich pasivní a aktivní realizace. Popište specifické vlastnosti a parametry definující DI box a způsoby, jak je těchto parametrů možné dosáhnout praktickou realizací. S ohledem na očekávané využití DI boxu stanovte vlastní hodnoty specifických parametrů (šířka pásma, vstupní a výstupní impedance, dynamický rozsah, fáze, harmonické zkreslení, vlastní šum, CMRR a další) a doplňkových funkcí (útlumový článek, změna polarity, filtr na vstupu a další). Na základě takto stanovených parametrů proveďte výběr součástek a DI box realizujte.
Experimentálním měřením ověřte skutečné vlastnosti a porovnejte s původně očekávanými.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Izhaki, R. Mixing Audio: Concepts, Practices, and Tools, Routledge, 3rd edition, 2017, ISBN: 978-1138859784.

[2] Self, D. Small Signal Audio Design, Elsevier, 2nd edition, 2014, ISBN: 978-0415709736.

Termín zadání: 3.2.2020 ***Termín odevzdání:*** 8.6.2020

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
Předseda rady studijního programu

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

Cílem této bakalářské práce je obeznámení se s teoretickými oblastmi týkající se problematiky impedančního přizpůsobení pomocí tzv. DI boxů. Jedná se tedy především o teorii symetrického a nesymetrického signálu, parametry typické pro DI boxy (THD, impedance, šířka pásma, dynamický rozsah atd.), znalosti ohledně transformátoru, respektive obecně ohledně cívek, či v neposlední řadě problematika operačních zesilovačů, která je pro návrh aktivního DI boxu naprosto nezbytná.
Na základě této teorie jsou následně stanoveny parametry navrhovaného DI boxu, které jsou porovnány s komerčně dostupnými modely. Cílem je dosáhnout lepších hodnot nebo se jim alespoň přiblížit. Dále je navrženo obvodové schéma, které je za pomoci simulace v programu Multisim od National Instruments optimalizováno pro dosažení předem stanovených parametrů.
S ohledem na výsledné specifikace DI box je dále navržena deska plošných spojů pro realizaci prototypu tohoto zařízení. Po jeho zhotovení je provedeno kontrolní měření pomocí APx525, jehož výsledky jsou pak porovnány s hodnotami, kterých bylo cílem dosáhnout.

Klíčová slova

DI box, impedanční přizpůsobení, symetrizace signálu, galvanické oddělení, transformátor

Abstract

The purpose of this bachelor thesis is to get acquainted with the theoretical areas related to the issue of impedance matching using the so-called DI boxes. It is mainly the theory of balanced and unbalanced signal, parameters typical for DI boxes (THD, impedance, bandwidth, dynamic range, etc.), knowledge about the transformer, respectively about the coils, or last but not least the issue of operational amplifiers, which is for designing of active DI box absolutely essential.

The specifications of the designed DI box based on this theory are subsequently determined and compared with commercially available models. The main target is to achieve better figures or at least get closer to them. Furthermore, the circuit diagram is designed and optimized to achieve predetermined parameters using simulation in the Multisim program from National Instruments.

Regarding the resulting specifications of the DI box, a printed circuit board is designed to build a prototype of the device. After its completion, a test gauging using APx525 is done and the results are compared to the target figures.

Keywords

DI-box, impedance matching, signal balancing, galvanic isolation, transformer

Bibliografická citace:

HAVELKOVÁ, Nikola. Způsoby impedančního přizpůsobení zdrojů akustického signálu při jejich následném zpracování [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125886. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Jaroslav Koton.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Způsoby impedančního přizpůsobení zdrojů akustického signálu při jejich následném zpracování jsem vypracovala 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 uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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.

V Brně dne: 8. 6. 2020 ……

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jaroslavu Kotonovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 8. 6. 2020 ……

podpis autora

OBSAH

Úvod 11
1. Teoretický úvod ... 12
1.1 DI-box ... 12
1.1.1 Dělení DI-boxů ... 12
1.2 Vlastnosti a parametry ... 14
1.2.1 Impedance a její přizpůsobení ... 14
1.2.2 Signál ... 15
1.2.3 CMMR ... 16
1.2.4 THD a THD+N ... 16
1.2.5 Dynamický rozsah ... 17
1.2.6 Šířka pásma ... 17
1.2.7 Šum ... 18
1.3 Stěžejní obvodové prvky ... 19
1.3.1 Transformátor ... 19
1.3.2 Operační zesilovač ... 23
1.4 Doplňkové funkce ... 23
1.4.1 Útlumový článek ... 23
1.4.2 Rozpojení zemnění ... 23
2. Návrh aktivního DI-Boxu ... 25
2.1 Parametry ... 25
2.2 Blokový diagram ... 26
2.3 Obvodové části ... 27
2.3.1 Vstup ... 27
2.3.2 Ochrana přepětí ... 28
2.3.3 Útlumový článek ... 29
2.3.4 Impedanční přizpůsobení ... 30
2.3.5 Operační zesilovač ... 31
2.3.6 Transformátor ... 33
2.3.7 Výstup ... 35
2.3.8 Groundlift ... 35
2.4 Simulace ... 35

2.5 Návrh desky plošných spojů 36
2.6 3D model 37
2.7 Realizace DI boxu 37
3. Měření 39
3.1 Frekvenční charakteristika 39
3.1.1 Frekvenční charakteristika pro PAD 40
3.1.2 Celkové harmonické zkreslení 41
3.1.3 Impedance 42
4. Závěr 44

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Blokový diagram aktivního DI-boxu 12
Obr. 1.2: Náhradní obvodové schéma zapojení zařízení s impedancí [3] 14
Obr. 1.3: Neharmonické, flaptop a notching zkreslení [7] 16
Obr. 1.4: Šířka pásma [10] 18
Obr. 1.5: Typy jader a rozmístění cívek [15] 21
Obr. 1.6: Vrstvené vinutí [14] 22
Obr. 1.7: Bifilární vinutí [14] 22
Obr. 1.8: Vliv materiálnu jádra na zkreslení [14] 22
Obr. 2.1: Blokový diagram původního návrhu 26
Obr. 2.2: Blokový diagram výsledného návrhu 26
Obr. 2.3: Schéma zapojení ochrany přepětí 28
Obr. 2.4: Schéma zapojení útlumového článku 29
Obr. 2.5: Schéma vnitřního zapojení TL072 [26] 31
Obr. 2.6: Schéma zapojení operačních zesilovačů 32
Obr. 2.7: Obvodově řešení pro napájení OZ 33
Obr. 2.8: Schéma zapojení transformátoru [28] 34
Obr. 2.9: Schéma zapojení transformátoru 34
Obr. 2.10: Návrh desky plošných spojů (vlevo horní vrstva, vpravo spodní vrstva) 36
Obr. 2.11: 3D model navrhovaného aktivního DI boxu 37
Obr. 3.1: Frekvenční charakteristika (pro 2,8 V_{pp}) 39
Obr. 3.2: Frekvenční charakteristika při útlumu 20 dB 40
Obr. 3.3: Celkové harmonické zkreslení 41
Obr. 3.4: Závislost vstupní impedance na frekvenci 42

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Porovnání parametrů DI-boxů [21,22,23] 25
Tab. 2.2 Hodnoty rezistorů útlumového článku 30
Tab. 2.3 Porovnání parametrů volených operačních zesilovačů [24,25] 31
Tab. 2.4 Výsledné hodnoty simulace 35

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je prostudování problematiky DI-boxů využívaných v audio technice. První část práce se zaměřuje na teoretickou stránku věci. Jsou zde rozebrány jednotlivé typy DI-boxů a jejich základní princip. Dále jsou zde popsány stěžejní parametry a vlastnosti, jejichž znalost je nezbytná pro pochopení problematiky DI-boxů. Tato část se také zabývá hlavními obvodovými prvky tohoto zařízení, jejich vlastnostmi a principem fungování.

Druhá část práce se zaměřuje již pouze na aktivní DI-boxy a vlastní obvodové řešení tohoto typu. Na základě porovnání konkurenčních řešení, jsou stanoveny parametry DI-boxu, kterých je cílem dosáhnout, případně se jim alespoň přiblížit. S ohledem na tyto parametry je vytvořeno základní obvodové řešení. Jsou zde rozebrány jednotlivé části obvodu a odůvodněny volby způsobu řešení. Následně je realizován prototyp, u kterého je pak kontrolním měřením ověřena funkčnost a dosahované specifikace. Na závěr je toto měření okomentováno a u případných nedostatků zmíněna možnost nápravy či vylepšení aktuálního řešení.

1. TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 DI-box

DI-box je zařízení, které se v audiotechnice využívá pro úpravu audio signálu, tedy signálu s frekvencí o rozsahu 20 Hz až 20 kHz, a to ať už symetrického, tak nesymetrického. Mezi nejčastější důvody jeho využití spadá přizpůsobení úrovní signálů, hodnot vstupní a výstupní impedance zařízení, převedení nesymetrického signálu na symetrický či přerušení tzv. zemní smyčky. [1,2]

1.1.1 Dělení DI-boxů

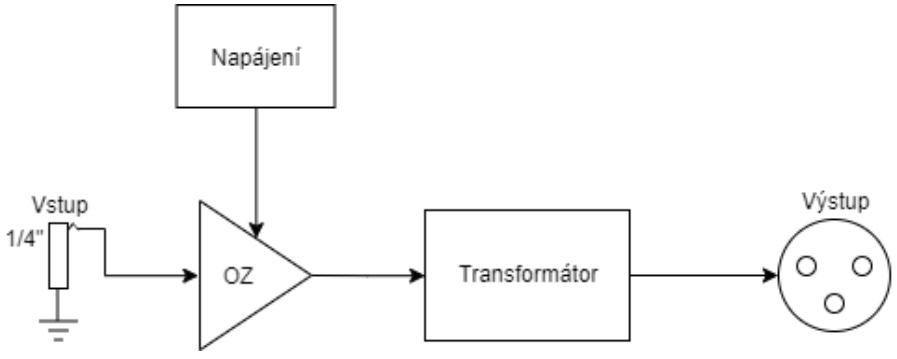
DI boxy lze dělit dle různých parametrů, jakožto například napájení, vstupní impedance či třeba podle typu vstupního signálu.
Na základě nutnosti napájení obvodu DI boxu je dělíme na formu aktivní a pasivní.

a) Aktivní DI-box

Aktivní forma DI boxu vyžaduje pro své správné fungování napájení, a to ať už fantomové přes signálové vedení, či interní například v podobě baterie. Nejčastějším důvodem napájení obvodového řešení tohoto typu je operační zesilovač, který může být využit mnoha způsoby. A to ať už pro symetrizaci signálu, zesílení signálu či pouze přizpůsobení impedance. Jelikož je tato práce zaměřena především na tento typ DI-boxu, podrobněji je tato forma rozebrána v kapitole Aktivní DI-box.

Aktivní typy jsou často nejuniverzálnější variantou a používají se převážně pro hudební nástroje.

Většina aktivních DI-boxů funguje na obdobném ne-li stejném principu, kde hlavní roli v obvodovém řešení hraje již zmíněný operační zesilovač. [1,2]



Obr. 1.1: Blokový diagram aktivního DI-boxu

Obecně lze říci, že na vstup, například konektor TRS, je přiváděn signál o určité úrovni. Často jde o signál nesymetrický, ale není to podmínkou. Tento signál je veden na operační zesilovač, kde na základě využití, a tedy i odlišného zapojení, může být signál pozměněn. Ať už se jedná o zesílení úrovně, symetrizaci, úpravu impedance či kombinace zmíněných.

Za operačním zesilovačem může následovat transformátor. Ten zde bývá především pro galvanické oddělení, případně i symetrizaci signálu. Výsledný signál je nakonec vyveden pomocí symetricky zapojeného XLR konektoru. [1,2]

b) Pasivní DI-box

V případě, že DI box neobsahuje žádné aktivní prvky, které by bylo nutno napájet, mluvíme o formě pasivní. Zpravidla je hlavním komponentem takovéhoto DI boxu především transformátor. Právě ten zajišťuje hlavní funkce jako jsou symetrizace signálu, přizpůsobení impedancí nebo galvanické oddělení. [1,2]

c) Další členění

Dalším parametrem, na základě kterého lze členit DI-boxy, je impedance. Řadí se zde například vysokoimpedanční, tedy Hi-Z DI-box, který je konstruován pro zařízení o vysoké výstupní impedanci, tedy například pasivní snímače elektrické kytary.

Existují i další typy DI-boxů, respektive se většinou jedná o speciální podkategorie již zmíněných typů. Mezi takové patří například izolátor vysokonapěťových signálů, známý také jako ISO, DI-boxy přizpůsobené pro konkrétní použití, jako je třeba úprava signálu z laptopu či multimediální DI-boxy. [1,2]

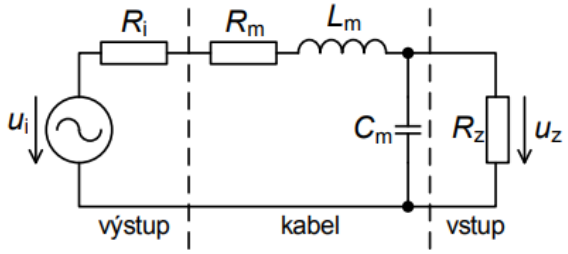
1.2 Vlastnosti a parametry

1.2.1 Impedance a její přizpůsobení

Základním důvodem, proč je zapotřebí přizpůsobit úrovně vstupní a výstupní impedance, tedy dosáhnout stavu, kdy jsou činitelé odrazu zátěže Γ_z a zdroje Γ_i komplexně sdruženy, je dosažení co nejpřesnějšího a nejméně zkresleného přenosu signálu.

K takovému ovlivnění signálu může dojít několika způsoby zapříčiněnými impedančním nepřizpůsobením. Může zde například vznikat tzv. stojaté vlnění, které může nadbytečně zatěžovat některé prvky obvodu zařízení, a tím je případně i poškodit.

V případě, kdy je impedanční nepřizpůsobení navíc skombinováno s delším vedením signálu, chová se tento celek jako rezonátor, kvůli čemuž se mohou jeho rezonancí blízkou určitým frekvencím právě tyto složky potlačit či zcela odfiltrovat. Jedná se především o frekvence vyšších hodnot, jelikož je tímto celkem (vstupní impedancí zdroje, výstupní impedancí zátěže a impedancí kabelu) tvořena dolní propusť. Napravit takto poškozený signál je téměř nemožné. [3]



Obr. 1.2: Náhradní obvodové schéma zapojení zařízení s impedancí [3]

K dalšímu znehodnocení signálu může dojít tak, že se odražená energie může s určitou latencí vrátit zpět na vstup, což se projeví jako tzv. efekt echo.

Co se odražené energie týče, je třeba nakonec ještě zmínit, že právě jejím odražením v místě nepřizpůsobení impedance dochází ke snížení energie vedené na zátěž, jsou-li tedy impedance vyrovnány ($R_z = R_i$), hodnota přeneseného výkonu P_z je nejvyšší, pro což platí následující vztah.

$$P_z = I^2 R_z = U_1^2 \frac{R_z}{(R_i+R_z)^2} \ [W] \tag{1.1}$$

Jako typická vstupní impedance audio zařízení může být zmíněna například impedance mikrofonního vstupu (1-2 kΩ), linkového vstupu (>10 kΩ) či vstup vysokoimpedanční (např. kytarové snímače, 100 kΩ až 1 MΩ). Výstupní impedance může u mikrofonního výstupu nabývat hodnot 100-300 Ω a linkové pouhých pár desítek ohmů. [3]

1.2.2 Signál

Prvotní příčinou, kvůli které je převáděn nesymetrický signál na symetrický, je zajištění co nejvyšší kvality signálu. Tedy maximální potlačení souhlasného rušení tzv. CMRR (Common Mode Rejection Ratio).

a) Nesymetrické vedení

Nesymetrické vedení je typ propojení pomocí pouze jednoho signálového vodiče, kladného pólu hot, a stínění ground, které chrání signál před interferencí, bohužel ne příliš výrazně. Takto vedené signály se v dnešní době využívají především kvůli kompatibilitě, jelikož jsou pro toto vedení v audiotechnice používány převážně TS či cinch konektory.

Tento typ vedení má poměrně mnoho nevýhod, jako je například vliv parazitních jevů, jako šum či interference, s čímž je spojená také omezená délka vedení (doporučená maximálně 5 m). Právě kvůli těmto nedostatkům bylo v první polovině 20. století v Bellových laboratořích vyvinuto symetrické vedení. Původně bylo sice navrženo jakožto vedení telekomunikační, ale i přes to je v nynějších letech nedílnou součástí audio techniky.

Kolem roku 1955 byl symetrický typ vedení obohacen o velice důležitý prvek, kterým je tří pinový XLR konektor. Ten byl vynalezen panem Jamesnem H. Cannonem. Do povědomí se konektor dostal ovšem o pár let později. Až zhruba od 80. let 20. století bylo běžné se s tímto typem konektoru setkat u kvalitnější zvukové techniky. Pro menší audio systémy, spotřební elektroniku nebo některé hudební nástroje je stále využíván nesymetrický signál. Zachování tohoto typu vedení je dáno jednak jednodušší realizací, nižšími náklady a v neposlední řadě dlouhá léta zaběhnutým způsob konstruování zařízení s TS konektory. [4,5]

b) Symetrické vedení

Symetrické vedení je realizováno pomocí tří vodičů, kdy první pól je samotné stínění, druhý aktivní pól vede přímý signál a třetí vodič je využit pro signál s převrácenou polaritou. Takto řešené vedení zajišťuje vysokou kvalitu přenosu signálu a co nejmenší vliv parazitních jevů.

Signál je dále přiveden na vstup zařízení, kde dojde ke zpětné inverzi signálu s opačnou fází. Následně jsou signály sečteny, čímž jednak dostaneme výsledný signál o vyšší amplitudě, ale také se tímto krokem vyruší parazitní šum či přeslechy.

Jak již bylo zmíněno výše, pro symetrické vedení se využívá tří pinových konektorů, převážně konektoru XLR. Kdy na první pin je přivedeno stínění *ground*, na druhý pin aktivní pól hot a na třetí vodič *cold*.

Dále lze využít například TRS konektor. Zde je zemnící vodič připojen na *Sleeve*, aktivní *hot* na *Tip* a *cold* na *Ring*. [4,5]

1.2.3 **CMMR**

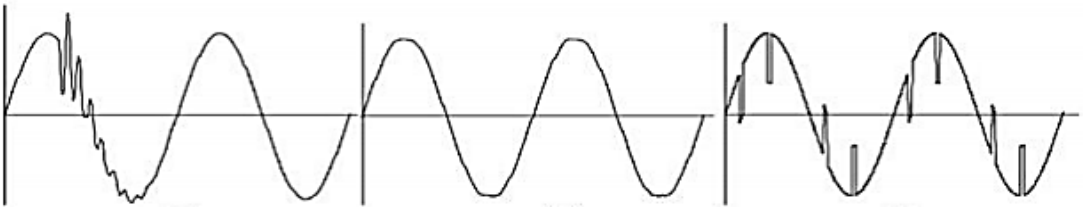
CMRR, z anglického Common-Mode Rejection Ratio, tedy činitel potlačení nežádoucích souhlasných signálů, je definován vztahem

$$CMRR = 20\log\frac{A_D}{A_{CM}} \ \text{[dB]}, \tag{1.2}$$

kde A_D je diferenční zesílení a A_{CM} zesílení souhlasného signálu. Za ideálních podmínek by se hodnota CMRR měla rovnat nekonečnu. To v praxi ovšem není možné. Běžná hodnota se pohybuje od 60 dB výše, v závislosti na kvalitě operačního zesilovače. [6]

1.2.4 **THD a THD+N**

THD (Total Harmonic Distortion), neboli celkové harmonické zkreslení, je míra zkreslení harmonického signálu zapříčiněna převážně nelineárními prvky obvodu. Toto nežádoucí zkreslení může mít tři podoby – neharmonické zkreslení, *flap top* a výřezové zkreslení (*notching*). [7,8]



Obr. 1.3: Neharmonické, flaptop a notching zkreslení [7]

Hodnota THD je rovna podílu efektivní hodnoty signálu a amplitudy první harmonické složky c_1, pro což platí následující vztah [7,8]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} c_k^2}}{c_1} \cdot 100 \quad [\%] \tag{1.3}$$

Obdobným parametrem je THD+N, který ovšem bere v potaz i šum *N*, respektive veškerou parazitní energii, o kterou se měřený signál liší od toho původního. [7.8]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} c_k^2 + N^2}}{c_1} \cdot 100 \quad [\%] \tag{1.4}$$

Hodnoty obou těchto parametrů jsou často udávány v procentech, lze je ovšem vyjádřit také pomocí decibelů, a to konkrétně následujícím převodem [6,7]

$$THD_{dB} = 20\log\frac{THD_{\%}}{100} \quad [\text{dB}] \tag{1.5}$$

1.2.5 **Dynamický rozsah**

Dynamický rozsah je hodnota rozdílu mezi maximální a minimální hodnotou signálu. Za maximální hodnotu L_{MAX}, je považována ta, kdy je celkové harmonické zkreslení v rozmezí 1–3 %. Minimální úroveň signálu, tedy L_{MIN}, může být buďto hodnota výstupního napětí při zkratovaném vstupu či úroveň EIN (Equivalent Input Noise), obecně lze za minimum považovat součet veškerých šumů a nežádoucích signálů, tedy *noise floor*. [9,11]

Dynamickou rezervu Δ_R zařízení lze tedy na základě výše zmíněného principu vypočítat následujícím vztahem.

$$\Delta_R = L_{MAX} - L_{MIN} \quad [\text{dB}] \tag{1.6}$$

Tento vzorec lze použít pouze pokud počítáme s hodnotou maximální úrovně signálu na výstupu.

Pakliže chceme počítat s hodnotou maximální vstupní úrovně signálu, je zapotřebí ještě odečíst celkové zesílení zařízení G. [9,11]

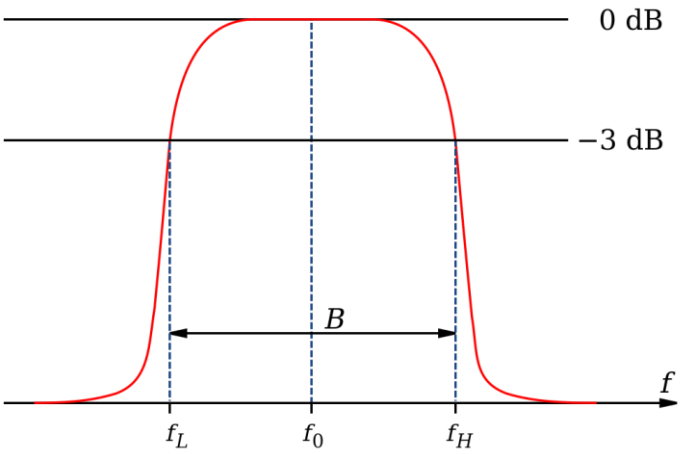
$$\Delta_R = L_{MAX} - L_{MIN} - G \quad [\text{dB}] \tag{1.7}$$

1.2.6 **Šířka pásma**

Šířku pásma je možné obecně popsat jako rozdíl mezi minimální f_L a maximální f_H hodnotou frekvence přenášeného signálu.

$$B = f_H - f_L \quad [\text{Hz}] \tag{1.8}$$

Hodnoty f_L a f_H jsou udávány pro pokles amplitudy zesílení A_M o 3 dB, tedy na hodnotu $\frac{A_M}{\sqrt{2}}$. Výsledná hodnota B tedy určuje, v jakém je signál přenášen. [10,11]



Obr. 1.4: Šířka pásma [10]

S tímto parametrem úzce souvisí frekvenční odezva, která udává, jak se na jednotlivých frekvencích ve frekvenčním pásmu signál chová. [10,11]

1.2.7 Šum

Šum je ve většině případů pro přenos signálu nežádoucí, bezvýznamný produkt, jelikož nepřenáší žádná přínosná data. Šumy se dělí na základě dvou parametrů. Prvním je vliv fyzikálních vlastností zařízení či okolí, zde patří například tepelný šum, výstřelový, blikavý či praskavý. Druhým aspektem je spektrální hustota, zde lze hovořit o tzv. šumech barevných.

Právě barevné šumy, jako například bílý, růžový (neboli $\frac{1}{f}$ šum), hnědý a další, tvoří výjimku, co se jejich využití týče. Jsou často používány pro měření audio systémů, jelikož energeticky pokrývají celé slyšitelné spektrum, s odlišným poklesem v závislosti na typu šumu. Například u růžového je pokles energie 3 dB na oktávu. [12,13]

a) Tepelný šum

Tepelný (Johnsonův) šum je zapříčiněn nahodilým pohybem volných elektronů v krystalové mřížce vodičů a polovodičů. Není závislý jak na proudu, tak ani na napětí, pouze na teplotě, která musí být vyšší než absolutní nula. Se zvyšující se

teplotou narůstá rychlost pohybujících se elektronů, čímž se následně zvyšuje hodnota tepelného šumu. Je možné jej tedy eliminovat pouze snížením teploty zařízení.
V případě, že je teplota a odpor konstantní, nabývá šum rovnoměrné výkonové spektrální hustoty a lze tak o něm mluvit jako o šumu bílém. [12,13]

b) Výstřelový šum

Výstřelový (Schottkyho) šum je způsoben prudkou změnou proudu elektronů, čímž vzniká ekvivalent rázové vlny. Jelikož závisí na protékajícím proudu, není možné ho nějakým způsobem eliminovat, tak jak tomu je u tepelného šumu. Je přirozeným jevem pohybu nosičů nábojů. [12,13]

c) Blikavý šum

Blikavý šum vzniká důsledkem narušení struktury krystalické mřížky polovodičů či nějakého jejich znečištění. Stejně jako výstřelový šum vzniká často v součástkách s přechodem mezi bází a emitorem. Projevuje se především změnou spektrální hustoty výkonu, a to konkrétně tak, že jeho energie klesá se zvyšující se frekvencí. Jedná se tedy o $\frac{1}{f}$ šum. [12,13]

d) Praskavý šum

Praskavý šum je opět $\frac{1}{f}$ šum, i zde tedy dochází ke změně spektrální hustoty a stejně jako u blikavého a výstřelového šumu vzniká na PN přechodech. Hlavními rozdíly jsou tak doba trvání, která je velice krátká, řádově až stotisíciny sekund, a také příčina vzniku, kterou je především znečištění ionty těžkých kovů. [12,13]

1.3 Stěžejní obvodové prvky

Mezi hlavní obvodové prvky patří transformátor a operační zesilovač, kterým se bude tato kapitola věnovat.

1.3.1 Transformátor

Ačkoliv jsou transformátory v porovnání s jinými obvodovými prvky cenově, rozměrově či váhově dosti nepříznivé, jejich využití v audiotechnice je mnohdy tím nejefektivnějším řešením. Pro audio zařízení jsou využívány především sdělovací, přesněji audio

transformátory, přenášející elektrický analogový signál. Lze je využít pro galvanické oddělení signálů, přizpůsobení impedance, napětí či symetrizaci signálu.

Mezi nejzákladnější součásti transformátoru patří vinutí a magnetické jádro, právě tyto prvky umožňují přenos elektrické energie, aniž by docházelo k fyzickému kontaktu jednotlivých vinutí. Zajišťují tak již zmíněné galvanické oddělení.

Jestliže tedy primární cívkou prochází střídavý proud, indukuje se kolem tohoto vodiče magnetický indukční tok, který je dále veden magnetickým jádrem na sekundární cívku. K přenosu elektrické energie dochází pouze za předpokladu, že na primární vinutí přivádíme střídavý či pulzující proud. V případě, že by se jednalo o proud stejnosměrný, neměnil by se magnetický indukční tok, a tím pádem by se nemělo jak indukovat napětí na sekundárním vinutí. Tento fakt je dán Faradayovým zákonem elektromagnetické indukce, který lze popsat vztahem

$$\varepsilon_F(t) = -\frac{d\Phi}{dt}, \tag{1.9}$$

kde ε_F představuje indukované elektromotorické napětí a Φ magnetický indukční tok.

Pakliže by se na primární cívce vyskytl proud stejnosměrný, hodnota magnetického indukčního toku by byla konstantní, a její derivace tudíž nulová. To by znamenalo nulové napětí na sekundárním vinutí. Ačkoliv výsledkem tohoto stavu není transformace signálu, může docházet k přesycení jádra, což pak negativně ovlivňuje případný další přenos signálu při střídavém proudu.

Pokud je na primární cívce střídavý proud, indukuje se na sekundárním vinutí na základě výše zmíněného zákona elektromotorické napětí v poměru k mezi vstupními a výstupními hodnotami, a to ať už napětí U, proudu I, počtu závitů cívek N_L či impedance Z, závislostí $k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$. Pokud je výsledná hodnota k vyšší než 1, jedná se o tzv. *step down* transformátor, pakliže je tomu naopak, hodnota poměru k je tedy nižší než 1, jde o tzv. *step up* transformátor. V případě, že je poměr k roven 1, jde pouze o transformátor oddělovací, jelikož výstupní hodnoty se oproti vstupním v takovém případě nemění. [14,15]

a) Cívka

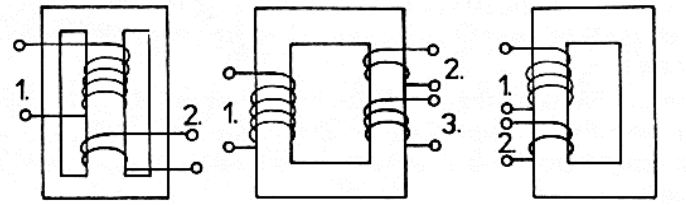
Cívky transformátoru jsou nejčastěji označovány jako primární a sekundární vinutí. Tato vinutí jsou v transformátorech tzv. induktorem, to znamená, že je nositelem

veličiny definující schopnost vodivého tělesa, kterým protéká elektrický proud, vytvářet magnetické pole.

Samotné vinutí je realizováno pomocí vodiče, jehož parametry, především tedy materiál je volen tak, aby měl co nejnižší rezistivitu, tedy co nejvyšší konduktivitu. Rezistivita ρ roste s narůstající teplotou, a to konkrétně na základě závislosti $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta t)$, kde ρ_0 značí počáteční rezistivitu, α je teplotní součinitel elektrického odporu a Δt je hodnota teplotního rozdílu.

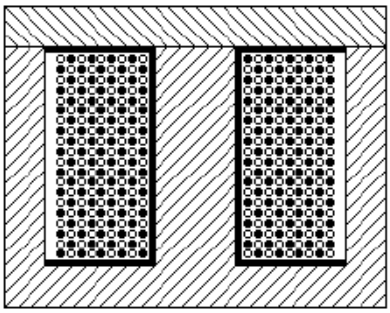
Nejčastěji voleným materiálem je měď díky jeho měrnému odporu $\rho = 0{,}018 \cdot 10^{-6}$ [$\Omega \cdot$ m] a také ceně, jelikož v porovnání se stříbrem, které má sice nižší měrný odpor, a to $\rho = 0{,}016 \cdot 10^{-6}$ [$\Omega \cdot$ m], je výrazně levnější, výsledně tedy značně efektivnější.

Transformátory se mohou lišit nejen materiálem, ale také umístěním cívek nebo jejich počtem. Zde lze tedy hovořit například o plášťovém nebo jádrovém transformátoru viz obrázek 1.4. [14,15]

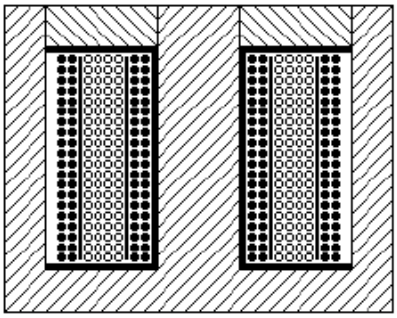


Obr. 1.5: Typy jader a rozmístění cívek [15]

Umístění primární a sekundární cívky vůči sobě je velmi důležité především z hlediska výsledné kvality přenášeného signálu. Obecně se doporučuje vinutí umístit, pokud možno co nejblíže k sobě, aby tak zůstaly ve stejném magnetickém poli. Mezi typy vinutí výhodné právě z tohoto hlediska patří bifilární vinutí, kdy jsou vodiče vinuty současně. Druhou obdobnou variantou je vinutí po vrstvách. [14,15]



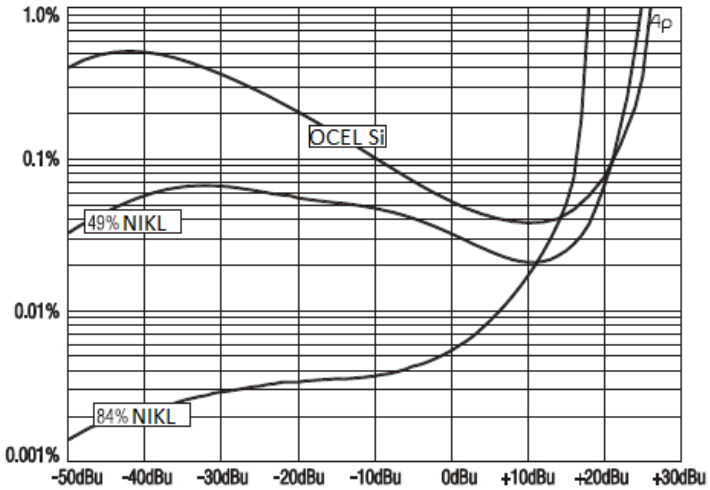
Obr. 1.7: Bifilární vinutí [14]



Obr. 1.6: Vrstvené vinutí [14]

b) Jádro

Pro výrobu jádra se často volí feromagnetické kovy, a to z toho důvodu, aby se co nejvíce potlačil vznik vířivých proudů, jelikož by mohlo dojít ke ztrátám, což by vedlo ke snížení množství přenesené elektrické energie magnetickým tokem. Tyto ztráty by se mohly projevovat uvolňování tepelné energie, tudíž by se transformátor zahříval. Ze stejného důvodu se jádra, kterými prochází střídavý proud, vyrábí často z jednotlivých plechů, které jsou vzájemně izolovány. Mluvíme o tzv. lístkových jádrech. Nejvíce využívanými materiály jsou 84% nikl, 49% nikl nebo ocel s obsahem křemíku do 6 % a nízkým obsahem uhlíku a dalších legujících prvků. V následujícím grafu lze vidět, jaký vliv má zvolený materiál jádra na zkreslení v závislosti na úrovni signálu. [14,15]



Obr. 1.8: Vliv materiálnu jádra na zkreslení [14]

Narůstající hodnota zkreslení je v nižších úrovních zesílení zapříčiněna magnetickou hysterezí a ve vyšších polohách pak magnetickou saturací. [14,15]

1.3.2 Operační zesilovač

I přes to, že byl dřívější elektronkový operační zesilovač původně konstruován pro realizaci matematických operací v analogových počítačích (odkud mimochodem pochází i jeho přívlastek operační), jeho dnešní podoba je velmi často užívaným analogovým obvodem, a to nejen v audio technice. Je oblíbenou volbou z mnoha důvodů. Ať už díky jeho různorodým možnostem zapojení a tím i mnoha odlišným využitím, tak i kvůli jeho vysoké kvalitě parametrů za poměrně nízkou cenu.

Operační zesilovač je konstruován tak, že jeho interní zapojení je tvořeno více zesilovacími stupni, tvořící analogový obvod o dvou vstupech, invertující (-) a neinvertující (+), jednom výstupu a dvou napájecích vývodech.

Mezi základní zapojení patří invertující a neinvertující operační zesilovač, kterých je využito při zapojení operačního zesilovače u navrhovaného obvodu. [16]

1.4 Doplňkové funkce

Doplňkové funkce DI-boxu se liší na základě uvážení výrobce a preferencí spotřebitele. Mezi ty nejužívanější se řadí útlumový článek a *groundlift*.

1.4.1 Útlumový článek

Útlumový článek je prvek, díky kterému lze snížit úroveň signálu o konkrétní hodnotu. Bývá konstruován na základě principu napěťového děliče, kdy požadované napětí U_b na příslušném rezistoru R_b se vypočítá pomocí napětí vstupního U, kterým je násoben poměr mezi hodnotou příslušného rezistoru a součtu všech rezistorů děliče.

Tedy $U_b = U\frac{R_b}{R_a+R_b}$.

Úrovně útlumu se často liší v závislosti na výrobci a na cílených vlastnostech zařízení. Univerzální volbou hodnoty útlumu bývá -20 dB, kterou nalezneme téměř na každém DI-boxu. Lze se ovšem ojediněle setkat i s jinými variantami. [17]

1.4.2 Rozpojení zemnění

Rozpojení zemnění neboli *ground lift* je funkce zabraňující zemní smyčce, v případě, že za jejím vznikem stojí propojení ochranné a signálové země.

Zemní smyčka je jev vznikající elektrickým propojením dvou či více zařízení o odlišných potenciálech vůči zemi, a to buď za pomoci zemnícího vodiče či kontaktu kovových šasi jednotlivých komponentů. Právě těmito částmi procházejí rušivé proudy, které negativně působí na potenciál vodičů přenášejících signál za následkem vzniku rušivých napětí, které řetězec není schopen rozeznat od signálu původního. Výsledkem tak může být brum o frekvenci kolem 60 Hz.

Základní prevencí před vznikem zemní smyčky je připojení zařízení k jednotnému zemnění, respektive zemnící sběrnici.

Pro přerušení zemní smyčky je nejčastěji využíváno galvanické oddělení (např. pomocí DI-boxu, respektive transformátoru), kdy obvodové části nejsou fyzicky propojeny. Dochází tak pouze k přenosu elektrické energie (případně impulzů, informací).

V případě transformátorů k přenosu dochází v elektromagnetickém poli indukovaném mezi primárním a sekundárním vinutím (viz kapitola Transformátory).

Galvanickým oddělení lze však vyřešit pouze signálová zemní smyčka. Zemní smyčka může vznikat také přes zem ochranou, což je následkem propojení signálové a ochranné země nesymetrickým vedením. [18,19]

Častou a nejbezpečnější polohou tohoto spínače je poloha *ground*, kdy je signálová zem propojena s ochranou. V případě, že se v systému objeví rušivá napětí, která nejsou eliminována galvanickým oddělením, tudíž se nevyskytují v signálové smyčce, lze využít přerušení propojení mezi ochranou a signálovou zemí, a to přepnutím vypínače do polohy *lift*. [20]

2. NÁVRH AKTIVNÍHO DI-BOXU

Cílem navrhovaného obvodového řešení aktivního DI-boxu je dosažení, pokud možno, co nejpříznivějších výsledných parametrů, jako je minimální celkové harmonické zkreslení, co nejnižší úroveň šumu nebo frekvenční rozsah pro maximální útlum signálu o 1 dB. V neposlední řadě je dbáno také na praktičnost celého zařízení, a to jak už co se zvolených doplňkových funkcí týče, tak i jejich případných ovládacích prvků. Vzhledem k tomu, že důležitým parametrem pro výsledný DI-box je také finanční náročnost, jsou následně u nejdůležitějších obvodových prvků brána v úvahu cenově různorodá řešení.

2.1 Parametry

Parametry jsou voleny na základě znalostí problematiky rozebrané v teoretickém úvodu, a také na základě porovnání komerčně dostupných modelů aktivních DI-boxů, které jsou uvedeny v tabulce č. 2.1.

Tab. 2.1 Porovnání parametrů DI-boxů [21,22,23]

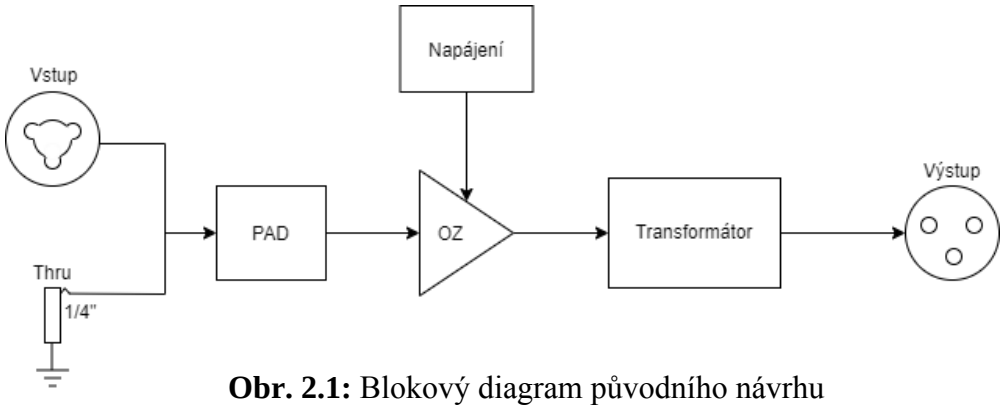
	Klark DN-100	BSS AR-133	Behringer Ultra-DI	Návrh
Přenos				
THD+N	<0,01 % pro 1kHz +4 dB	<0,005 % pro 1kHz 0 dB	<0,014 % pro 1kHz .	<0,005 % 0 dB
Frekvenční rozsah	20 Hz-20 kHz +0,5/-1 dB	30 Hz-20 kHz +0/-1 dB	10 Hz-70 kHz -3 dB	20 Hz - 20 kHz +0,5/-0,5 dB
Šum	-100 dBu	-105 dBu	-100 dBu	-105 dBu
Vstup				
Impedance	1 MΩ TS/20 kΩ XLR	1 MΩ	-	1 MΩ
Max level	+40 dBu	+49 dBu	+52 dBu	+52 dBu
XLR	Symetrický	Nesymetrický	-	Nesymetrický
TRS	Symetrický	Nesymetrický	Nesymetrický	Nesymetrický
TRS/Link	Nesymetrický	Nesymetrický	-	Nesymetrický
Výstup				
Impedance	300 Ω	600+ Ω	-	300+ Ω
Typ	Gal. oddělen +symetrický	Gal. oddělen +symetrický	symetrický	Gal. oddělen +symetrický
Napájení				
Typ	Fantom	Fantom + baterie	Fantom + baterie	Fantom + baterie
	Spínaný zdroj	Spínaný zdroj	-	Jiné
Ostatní				
PAD	-30 dB	-20 dB, -40 dB	-20 dB, -40 dB	-10 dB, -20 dB, -40 dB
	Tlačítkový spínač	Páčkový spínač	Posuvný spínač	Otočný spínač
Groundlift	Ano	Ano	Ano	Ano
Cena	do 2 500 kč	do 2 500 kč	do 600 kč	do 2 000 kč

Porovnány jsou DI-boxy DN-100 od firmy Klark Teknik, BSS AR-133 a Ultra-DI od Behringera. První dva modely byly zvoleny z toho důvodu, že patří mezi nejznámější a nejužívanější DI-boxy. Třetí model od firmy Behringer byl pro porovnání zvolen kvůli jeho nižší pořizovací ceně. Již prvním aspektem napovídajícím, že se jedná o méně kvalitní model, jsou uvedené parametry v dokumentaci. Ty jsou buď nepřesné, neúplné či zde zcela chybí.

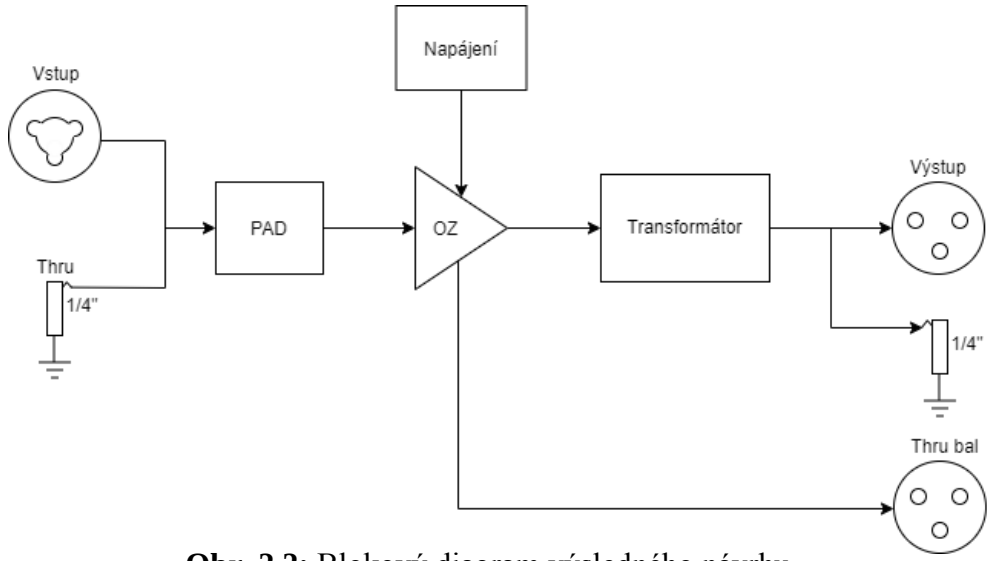
Cílem zvolených parametrů je dosáhnout co nejlepší kvality výsledného signálu a získat alespoň pomocí doplňkových funkcí originální aktivní DI-box.

Některé parametry bylo možné simulovat, a tak jsou jejich výsledky uvedeny v kapitole Simulace.

2.2 Blokový diagram



Obr. 2.1: Blokový diagram původního návrhu



Obr. 2.2: Blokový diagram výsledného návrhu

Navrhované obvodové řešení, které je výše znázorněno pomocí blokového diagramu (obr. 2.1), je pouze základní verzí, u které byly brány v úvahu změny, ať už stěžejních prvků či doplňkových funkcí, za účelem dosažení ještě lepších vlastností DI-boxu.
Jak lze vidět v porovnání s blokovým diagramem na obrázku 2.2, konečný návrh se liší především přidáním výstupního konektoru, který je veden před transformátorem, avšak i tak je symetrizován, podrobněji viz kapitola Výstup.
V blokovém diagramu lze na vstupu vidět konektor Combo, který je jak pro TRS, tak i pro XLR zapojen nesymetricky. Na tento vstupní konektor je přiváděn nesymetrický signál, který je dále veden na útlumový článek s několika možnostmi útlumu.
Signál je poté symetrizován pomocí dvou operačních zesilovačů, které jsou napájeny buďto fantomovým napájením, či 9V baterií.
Takto upravený signál je následně galvanicky oddělen za pomoci audio transformátoru o převodním poměru 1:1. Nedochází tak k zesílení či zeslabení úrovně signálu, ale pouze k již zmíněnému galvanickému oddělení.
Výsledný symetrický signál je vyveden pomocí symetrického XLR případně TRS konektoru.

2.3 Obvodové části

V této kapitole jsou rozebrány jednotlivé části navrhnutého obvodového řešení, jejich funkce, výhody a případné nedostatky

2.3.1 Vstup

Předpokládaným vstupním signálem byl signál nesymetrický o vysoké impedanci. Navrhovaný DI-box je tedy konstruován za cílem zpracování signálu generovaného například pasivním snímačem elektrické kytary, kde impedance dosahuje hodnot až 1 MΩ.
Na vstupu je umístěn konektor typu Combo, tedy hybrid XLR a TRS konektoru. Takto volený konektor zde je proto, že je tímto nahrazena často užívaná varianta vzájemně propojených vstupních konektorů XLR a TRS. Tímto krokem bude ušetřeno nejenom místo využitelné pro jiné prvky, ale také je cenově shodný ne-li výhodnější. Pochopitelně v závislosti na konkrétním typu (především XLR konektoru) pro jejich vzájemné porovnání, jelikož právě cenový rozsah XLR je poměrně široký.

Combo konektor je zde možné využít díky jeho vzájemně odděleným pinům, včetně pinů zemnících.

Vstupní jednotka je vybavena ještě o jeden TRS konektor, který umožňuje odbočení neovlivněného vstupního signálu. Využití pro tento prvek nacházejí především kytaristé, pakliže potřebují vést signál jak do mixážního pultu, tak i do svého kytarového komba.

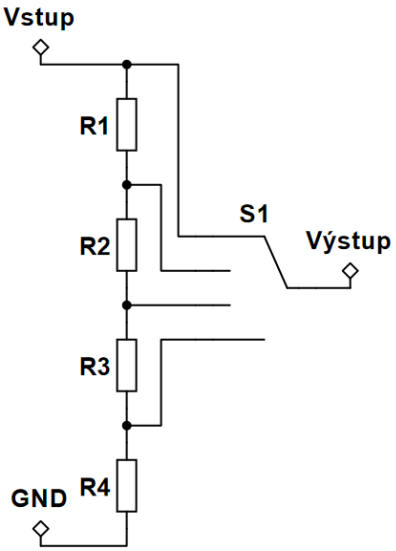
2.3.2 **Ochrana přepětí**

Obr. 2.3: Schéma zapojení ochrany přepětí

Hned za vstupním konektorem je umístěna ochrana přepětí, a to za pomoci dvou Zenerových diod, které jsou konstruovány pro nízké hodnoty výkonu. To by vzhledem k využití nemělo být problémem, jelikož výkon by podle všeho neměl přesáhnout hodnotu 0,5 W. Zenerovy diody jsou zde využity z toho důvodu, že jde o typický a často se vyskytující způsob ochrany přepětí u obvodových řešení, kde se nevyskytují příliš vysoké hodnoty výkonu. Nejedná se však o prvek konstruovaný přímo pro tyto účely a v případě, že by se na vstupu vyskytl signál o vysokém výkonu, mohlo by následně dojít k poškození ostatních obvodových prvků. Tento případ je však s ohledem na způsob využití velice nepravděpodobný.

2.3.3 Útlumový článek

V tomto obvodovém řešení disponuje útlumový článek neboli PAD třemi možnostmi zeslabení úrovně vstupního signálu o 10 dB, 20 dB a 40 dB.



Obr. 2.4: Schéma zapojení útlumového článku

Prvek je ovládán pomocí čtyřpolohového otočného spínače, což je přínosné především z hlediska jednoznačnosti zvolné hodnoty útlumu. U mnohých DI-boxů jsou použity jednoduché tlačítkové spínače, u kterých bez vyzkoušení útlumu přepnutím do jiné polohy není vždy stoprocentní, jak je nastaven.

Útlumový článek je realizován čtyřmi rezistory zapojenými dle principu napěťového děliče. Hodnoty jednotlivých odporů jsou voleny na základě výpočtů vycházejících z tohoto vztahu $U_b = U \cdot \frac{R_b}{R_a + R_b}$, jehož princip funguje na základě Ohmova zákona a faktu, že napětí paralelní jsou shodná.

Potřebná je také znalost výpočtu zesílení signálu $A_U = 20 \log \frac{U_2}{U_1}$, abychom mohli přepočítat hodnoty útlumů z decibel na poměr mezi výstupním napětím U_2 a vstupním napětím U_1. Abychom zjistili kolikrát se tedy úroveň signálu zmenší, volíme pro jednoduchost $U_1 = 1\ V$, dále značené jako U_{IN} a výsledné napětí U_2 označené jako U_{OUT}. Jako příklad je níže uveden výpočet pro útlum o 10 dB.

$$A_U = 20 \log \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \tag{2.1}$$

$$U_{OUT} = 10^{\frac{A_U}{20}} \cdot U_{IN} \tag{2.2}$$

$$U_{OUT} = 0{,}316\ V$$

Výstupní signál je tedy 3,16krát slabší než původní. Tato informace je nezbytná pro výpočet hodnot rezistorů zajišťujících daný útlum. Je důležité zmínit, že výše vypočítaná amplituda výsledného zeslabeného signálu je níže označena jako U_b.

$$U_b = U \frac{R_b}{R_a + R_b} \tag{2.3}$$

$$R_b = \frac{R_a U_b}{U - U_b} \tag{2.4}$$

$$R_b = 4{,}619\ \text{k}\Omega$$

Zde si musíme uvědomit, že výsledná hodnota R_b se nerovná odporu R_2, viz zapojení útlumového článku. Jde o součet sériově zapojených rezistorů $R_2, R_3\ a\ R_4$. Končenou hodnotu dostaneme až po dopočítání všech ostatních poměrů.

Vypočtené hodnoty odporů jsou pro obvodové zapojení přizpůsobeny výsledkům simulace a hodnotám dostupných rezistorů viz tabulka č. 2.2.

Tab. 2.2 Hodnoty rezistorů útlumového článku

	R_1	R_2	R_3	R_4
	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]
Vypočteno	10	3,158	1,316	0,146
Použito	10	3,3	1,3	0,15

2.3.4 **Impedanční přizpůsobení**

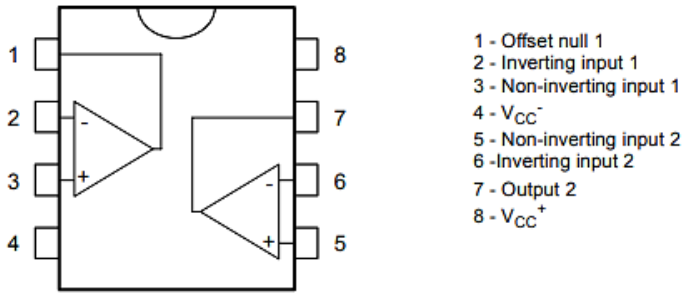
Pro dosažení vysoké vstupní impedance, tím pádem dosažení impedančního přizpůsobení kupříkladu elektrické kytaře s pasivním snímačem, je na vstupním signálu přidán rezistor o vysoké hodnotě, konkrétně 1 MΩ. Ačkoliv jsou rezistory o takto vysokých hodnotách poněkud nevhodné pro nízkofrekvenční obvody, kde je kladen důraz na co nejnižší vnitřní šum, není tento rezistor umístěn v přímé signálové cestě, tudíž by jeho vliv na výsledné hodnoty šumu neměly být příliš razantní.

2.3.5 **Operační zesilovač**

Původně zvažovaným operačním zesilovačem byl model OPA1612 od firmy Texas Instrumenst, který disponuje svými velice dobrými parametry. Ovšem aby se tyto parametry co nejvíce zachovaly, bylo by za potřebí vytvořit velice precizní desku plošných spojů. Celkově se tak stala tato možnost cenově i časově neefektivní, a proto je nynější volbou operační zesilovač od téže společnosti. Jedná se o model osvědčený a v audio zařízeních hojně využívaný operační zesilovač TL072, jehož cena je výrazně nižší a jeho parametry jsou i tak stále vhodné.

Tab. 2.3 Porovnání parametrů volených operačních zesilovačů [24,25]

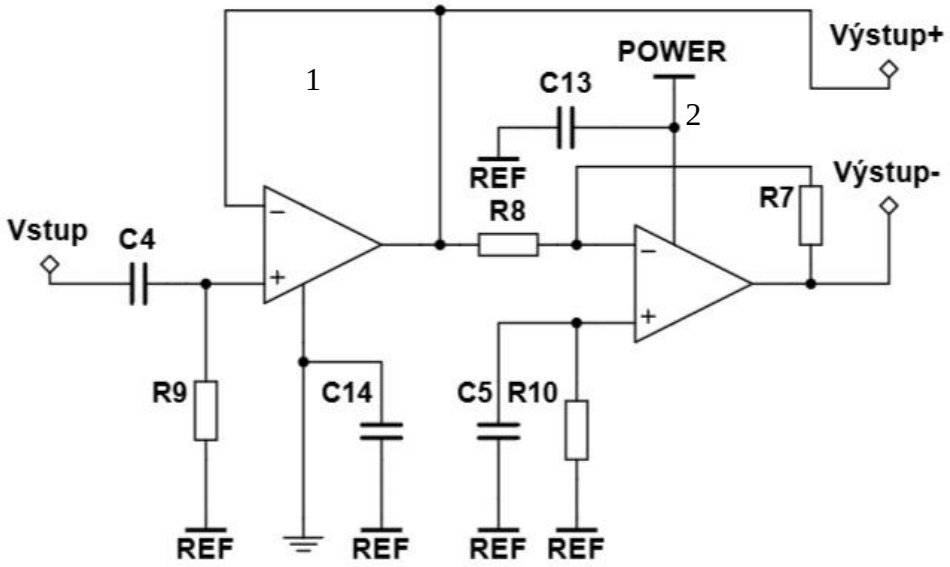
	OPA1612	**TL072**
Typ	bipolární	bipolární
THD	0.000015 % na 1 kHz	0.003 %
Šum	1.1 nV/√Hz na 1 kHz	18 nV/√Hz na 1 kHz
Rychlost přeběhu	27 V/µs	13 V/µs
Min napájecí napětí	±2,25 V	±5 V
Max napájecí napětí	±18 V	±15 V
Cena	156 Kč	16 Kč



Obr. 2.5: Schéma vnitřního zapojení TL072 [26]

V tomto modelu jsou využity operační zesilovače dva, které jsou v navrhovaném schématu zapojeny tak, že první z nich je zapojen jako operační zesilovač neinvertující a druhý naopak jako invertující.

Dle typického využití byl na invertující vstup operačního zesilovače 2 umístěn rezistor R8 a do zpětnovazební smyčky (taktéž operačního zesilovače 2) rezistor R7, kdy se hodnoty těchto rezistorů rovnají, aby tak nedocházelo k zesílení signálu. R9 zajišťuje vysokou hodnotu vstupní impedance. Kondenzátor C5, C13 a C14 jsou v zapojení jako tzv. *decoupling* kondenzátory, C4 slouží jako filtrace stejnosměrné složky napětí.



Obr. 2.6: Schéma zapojení operačních zesilovačů

Cílem tohoto zapojení je v prve řadě symetrizace signálu, která bývá často prováděna pomocí transformátoru a operační zesilovač je pak použit především pro případné zesílení signálu. V průběhu navrhování zapojení byla ovšem nalezena výhoda právě v této variantě využití, a to skrze symetrický XLR výstup, který je ovšem vyveden ještě před transformátorem (viz kapitola Výstup).

a) Napájení

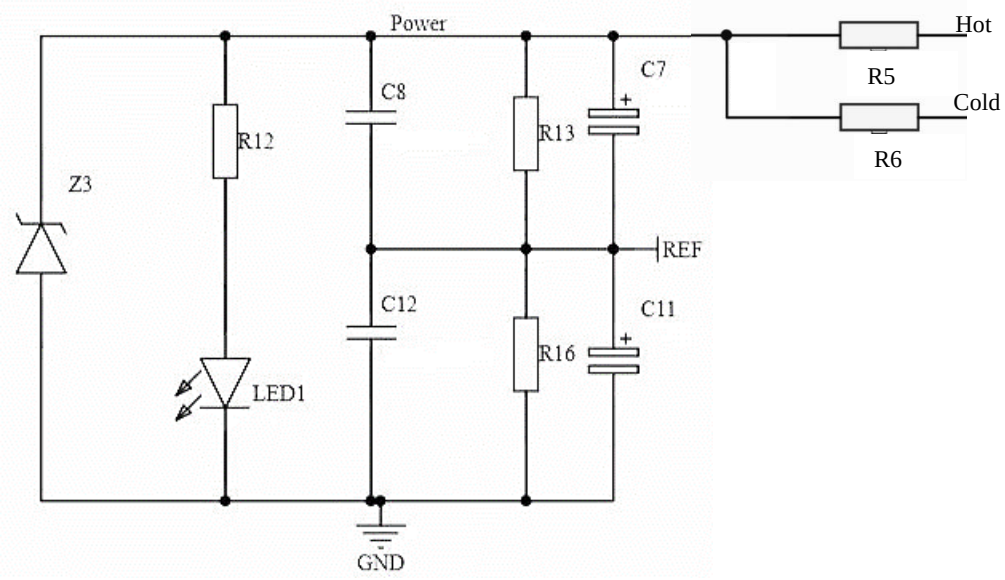
Napájení navrhovaného DI boxu je řešeno jak za pomoci 9V baterie, tak i fantomového napájení vedeného z mixážního pultu přes výstup DI boxu. Tyto dvě varianty jsou mezi sebou přepínatelné klasickým dvoupolohovým páčkovým spínačem. Napájení je signalizováno LED diodou. K baterii je sériově zapojena usměrňovací dioda.

Obvod pro využití fantomového napájení je nezvykle řešen bez hojně využívaného spínaného zdroje, kterému bylo záměrem se vyhnout hned ze dvou důvodů. Tím

prvním je jednak možné generování rušení, které nelze zcela odfiltrovat, ale především je nejvíce poruchovou částí obvodů DI-boxů.

Tato metoda tedy byla nahrazena vytvořením referenčního bodu pro operační zesilovač, a to konkrétně aplikací virtuální nuly v polovině napájecího rozsahu, aby tak bylo zajištěno symetrické napájení.

Nevýhodou tohoto zapojení, respektive jeho potenciální riziko spočítá v tom, že při možném vzniku chyby (například prudkým nárazem zařízení), kdy by došlo i ke krátkodobému přerušení kontaktu jednoho z kondenzátorů C7, C11, nastane stav, při kterém se operační zesilovač začne napájet nesymetricky a celý obvod začne oscilovat.



Obr. 2.7: Obvodově řešení pro napájení OZ

Paralelně k výstupu je umístěna nezbytná součást obvodu fantomového napájení v podobě dvou 6k8 rezistorů. Tyto rezistory jsou známy jako P48 standard, kdy jsou jejich hodnoty zvoleny tak, aby omezili proud na přibližných 14 mA, aby tak nemohlo dojít k závažnějšímu poškození obvodu. Zároveň byla hodnota 6,8 kΩ zvolena tak, aby zbytečně nezatěžovala DI box, ale aby zde naopak nedocházelo k značnému úbytku napětí. [27]

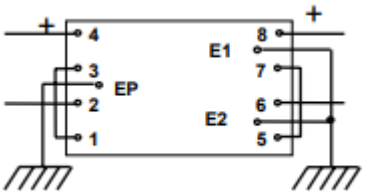
2.3.6 Transformátor

Po širším průzkumu audio transformátorů byl pro navrhované obvodové řešení zvolen model LL1570 od švédské firmy Lundahl. Ačkoliv tato volba činí výsledný návrh cenově

mnohem dražší, je tento krok opodstatněný. Transformátor byl záměrně vybírán od této firmy obzvláště na základě vlastností produktu a praktických zkušeností s ním. Jedná se o kvalitně zpracovaný obvodový prvek. Jádro transformátoru je vyrobeno z mu-metalu, tedy slitiny o přibližně 80 % příměsi niklu. Závislost zkreslení signálu na tomto materiálnu je uvedena v teoretické části, konkrétně v kapitole 1.3.1. (obr. 1.7).

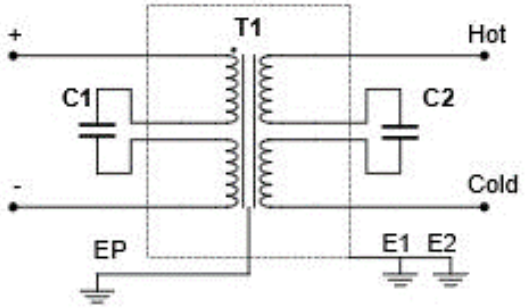
Jak již bylo zmíněno, transformátor je v návrhu pouze pro galvanické oddělení. Jeho převodní poměr je 1:1, takže signál nijak nezesiluje, což ovšem neznamená, že výstupní signál jim není nijak ovlivněn. Jeho vlastnosti signál nepatrně zkreslí, což tvoří výslednou originalitu zvuku.

Zapojení tohoto prvku v obvodu vychází ze schématu doporučeného zapojení z dokumentace produktu pro sériové zapojení cívek, kde uváděné zemnění odpovídá v navrhovaném schématu označení GND.



Obr. 2.8: Schéma zapojení transformátoru [28]

Jak lze vidět v níže uvedeném schématu, mezi cívkami, jak na primární, tak i na sekundární straně, jsou vloženy elektrolytické bipolární kondenzátory C_1 a C_2 pro odfiltrování stejnosměrné složky napětí. Hodnota těchto kondenzátorech, tedy 47 µF, byla zvolena tak, aby nedocházelo k poklesu napětí na nižších frekvencích. Konkrétně tato hodnota byla zvolena experimentálně z dostupných hodnot bipolárních kondenzátorů.



Obr. 2.9: Schéma zapojení transformátoru

2.3.7 **Výstup**

Výstupní symetrický signál je vyveden klasickým tří-pinovým symetricky zapojeným XLR konektorem. Kromě toho je zde i symetricky zapojený výstupní TRS konektor. Ten lze využít třeba pro odbočení galvanicky odděleného signálu například do kytarového komba, což může být žádoucí, pakliže hudebních preferuje zvuk upravený transformátorem.

Pokud by ovšem preferoval signál čistý, ale bylo by zapotřebí jej vést jako symetrický, je zde pro tuto variantu poslední XLR konektor, jehož signál je symetrizován operačními zesilovači, ale je vyveden již před transformátorem. Zvuk tak zůstává zcela čistý. Je však zapotřebí si uvědomit, že tato cesta není galvanicky oddělena.

Kombinace těchto zapojení konektorů, ať už vstupních či výstupních, dává uživateli nespočet možností využití tohoto DI boxu.

2.3.8 **Groundlift**

Pro umožnění rozpojení výstupního signálového zemnění od zemnění DI boxu je u výstupního XLR konektoru přidán dvoupolohový páčkový spínač. Zem vedoucí od spínače pokračuje ještě přes redukci šumu, tedy RC článek.

2.4 **Simulace**

Pro simulaci obvodového řešení bylo využito programu Multisim od National Instruments, a to konkrétně proto, že disponuje rozsáhlou databází SPICE dat komponentů. V některých případech byl pro dosažení přesnějšího výsledku do programu implementován konkrétní typ obvodového prvku.

Simulací byla tedy alespoň zkontrolována integrita návrhu, zjištěn předpoklad jeho chování a ověřeno tak, zdali je teoreticky možné se realizací alespoň přiblížit cíleným hodnotám. Výsledky simulace jsou uvedeny v tabulce č. 2.3 a grafy simulace v přílohách 2 a 3.

Tab. 2.4 Výsledné hodnoty simulace

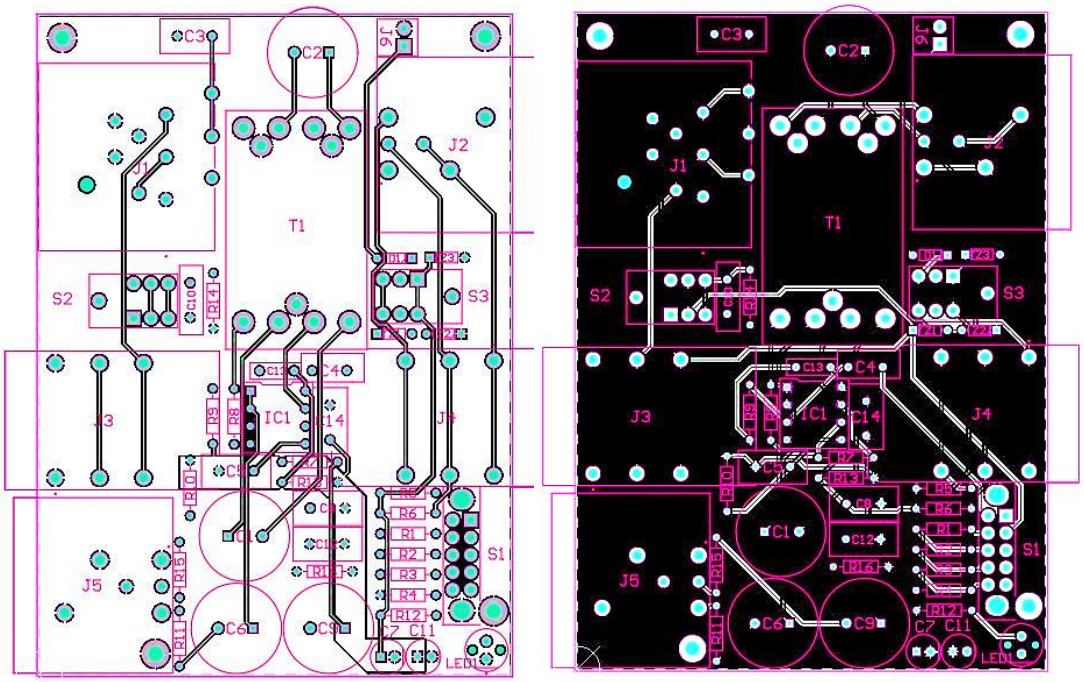
THD	Z	Frekvenční charakteristika		PAD
		Rozsah	Přesnost	
[%]	[Ω]	[Hz]	[dB]	[dB]
0,001	+350	20 – 20k	+0/-0,1	10, 20, 40 (+0/-0,5)

2.5 Návrh desky plošných spojů

Deska plošných spojů byla navržena jako dvouvrstvá. Především kvůli tomu, aby bylo snazší vést jednotlivé cesty co nejkratší a nejméně komplikovanou trasou, nejlépe přímou cestou, tak aby byl úhel trajektorie neměnný. V případech, kde to možné nebylo, bylo využito zlomu o úhlu 45 °. Nikde nebylo využito pravého úhlu, jelikož je takto navrhnutá cesta problematická nejen skrze výrobní proces, ale také kvůli tomu, že výsledná šířka cesty není konstantní. To by mohlo negativně ovlivnit výsledné parametry zařízení.

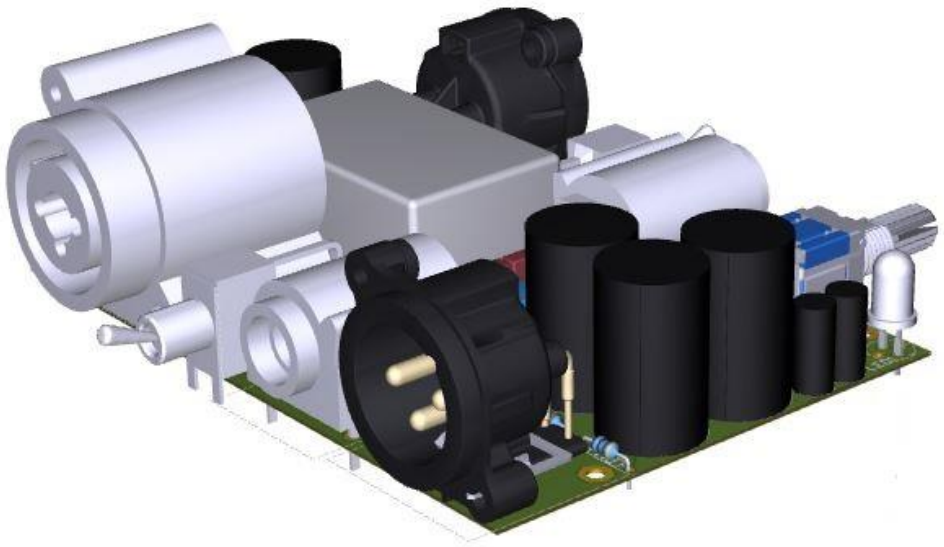
Snahou také bylo, aby se trasy horní a dolní vrstvy vzájemně křížily a nebyly naopak rovnoběžné. Vztyčná plocha je tak co nejmenší, což ve výsledku znamená nižší riziko vzniku přeslechů a parazitní kapacity mezi vodiči.

Deska byla navrhována se snahou uspořit co nejvíce místa a vytvořit tím tak pokud možno co nejmenší variantu tohoto zařízení.



Obr. 2.10: Návrh desky plošných spojů (vlevo horní vrstva, vpravo spodní vrstva)

2.6 3D model



Obr. 2.11: 3D model navrhovaného aktivního DI

Na tomto 3D modelu lze vidět výsledný návrh aktivního DI boxu, především pak rozmístění jednotlivých obvodových součástek.

Přední strana, obsahující vstupní combo konektor, páčkový přepínač pro groundlift, dále disponuje vstupním TRS konektorem a v neposlední řadě již zmiňovaným symetrickým XLR výstupní konektorem bez galvanického oddělení.

Na druhé straně je umístěn výstupní XLR konektor s galvanickým oddělením (tedy i celkovým vlivem transformátoru), dvoupolohový přepínač pro změnu zdroje napájení operačních zesilovačů, výstupní TRS konektor, čtyřpolohový otočný spínač útlumového článku, a nakonec LED indikace napájení.

2.7 Realizace DI boxu

Prototypová verze DPS byla z finančních, a také časových důvodů vyhotovena na úkor výsledné kvality. Jednalo se tedy o obyčejnou desku plošných spojů bez nepájivé masky, popisků jednotlivých prvků, s některými chybně navrtanými otvory a především, což považuji za nejvýznamnější problém celé desky, s neprokovenými otvory, což mělo zajišťovat především kontakt mezi horní a spodní vrstvou.

Ačkoliv se u nejdůležitějších prvků podařilo prokovení nahradit propájením kontaktů z obou stran, u některých tato možnost nebyla kvůli konstrukci daných prvků či celkovému rozmístění. V nezbytných případech byla proto plošná cesta nahrazena jednoduchým měděným signálovým vodičem.

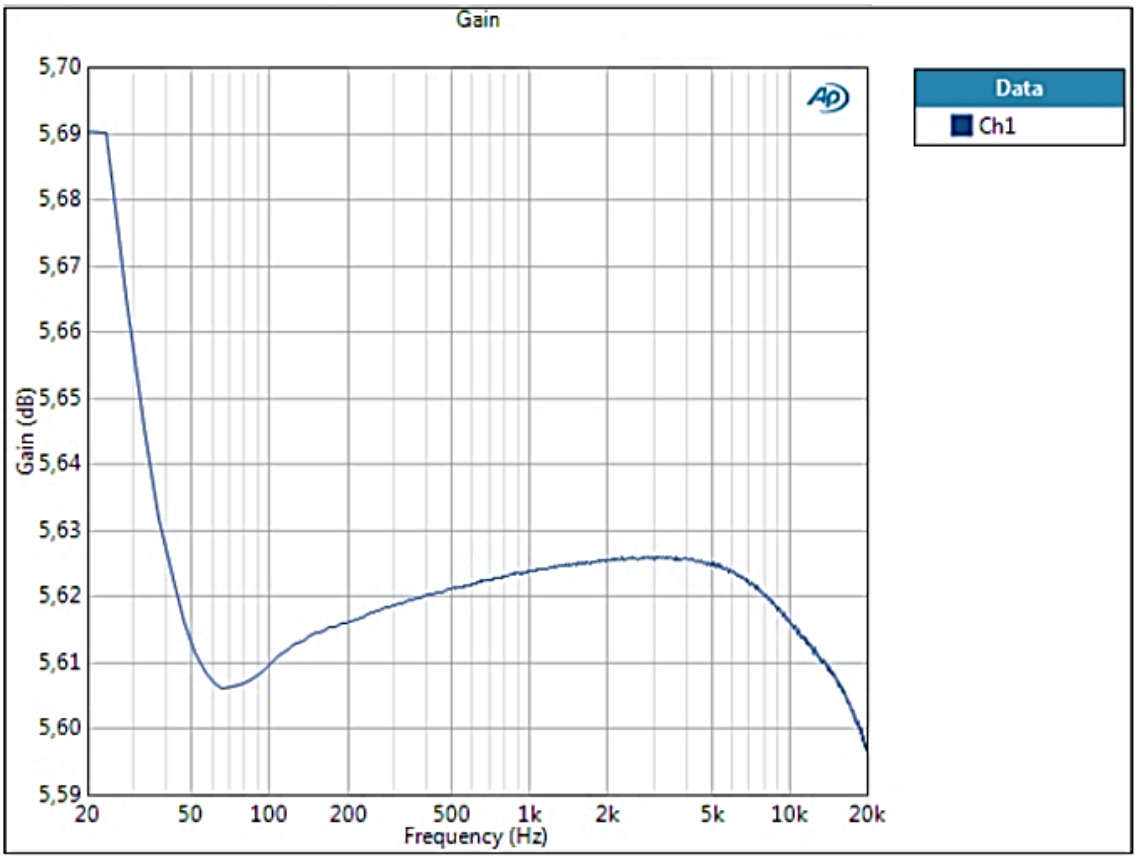
Již zde tak došlo k předpokladu, že výsledné hodnoty měření zařízení nebudou kvůli těmto chybám zrovna excelentní.

3. MĚŘENÍ

Měření zrealizovaného návrhu na desce plošných spojů byl proměřen analyzátorem APx525 a APx1701 firmy Audio Precision. Veškerá měření probíhala se zapojením vstupního signálu pouze na vstupní combo konektor a vyvedením signálu symetrickým výstupní XLR konektorem, a to z důvodů vzniklých potíží s deskou plošných spojů objasněných v kapitole 2.5. Všechny

3.1 Frekvenční charakteristika

Jak je uvedeno v tabulce 2.1 s parametry, kterých bylo již popsaným postupem navrhování DI boxu cílem dosáhnout, frekvenční charakteristika by měla ideálně vycházet s rozsahem od 20 Hz do 20 kHz o útlumu signálu +/-0,5 dB. Ani v jednom případě nebyla u srovnávaných modelů nalezena hodnota napětí vstupního signálu. První měření bylo tedy provedeno při napětí 1 V_{RMS} (tedy 2,8 V_{pp}), jelikož typicky využívaná hodnota linkového signálu se pohybuje právě kolem 1 V_{RMS}.

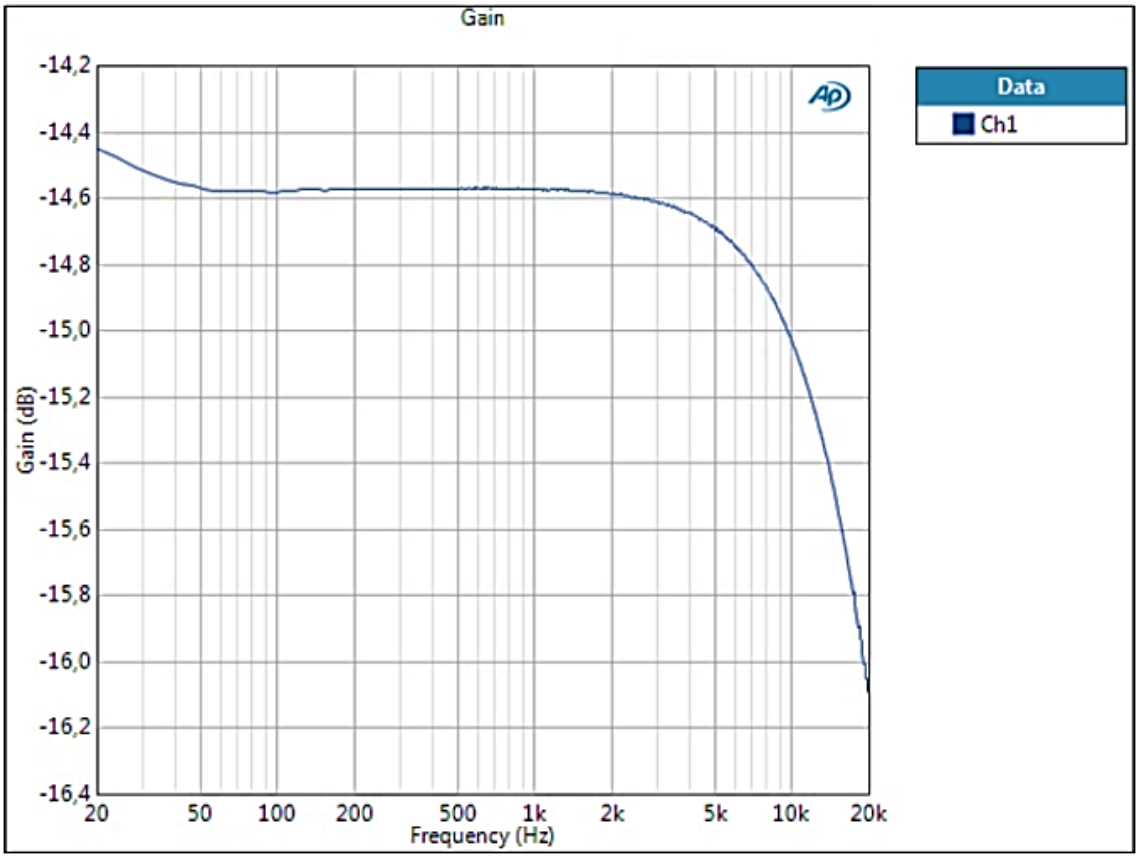


Obr. 3.1: Frekvenční charakteristika (pro 2,8 V_{pp})

Pro tuto hodnotu vstupního signálu byl frekvenční rozsah změřen s pouze nepatrnou odchylkou zesílení. Celý graf je posunut přibližně o 6 dB kvůli symetrickému signálu.
Při vyšších hodnotách vstupního napětí již byly výsledné křivky horší. Například pro dvojnásobnou hodnotu, tedy pro vstupní napětí 2 V_{RMS} (5,6 Vpp) vycházela zesílení frekvenční charakteristiky až +/-1,14 dB.

3.1.1 **Frekvenční charakteristika pro PAD**

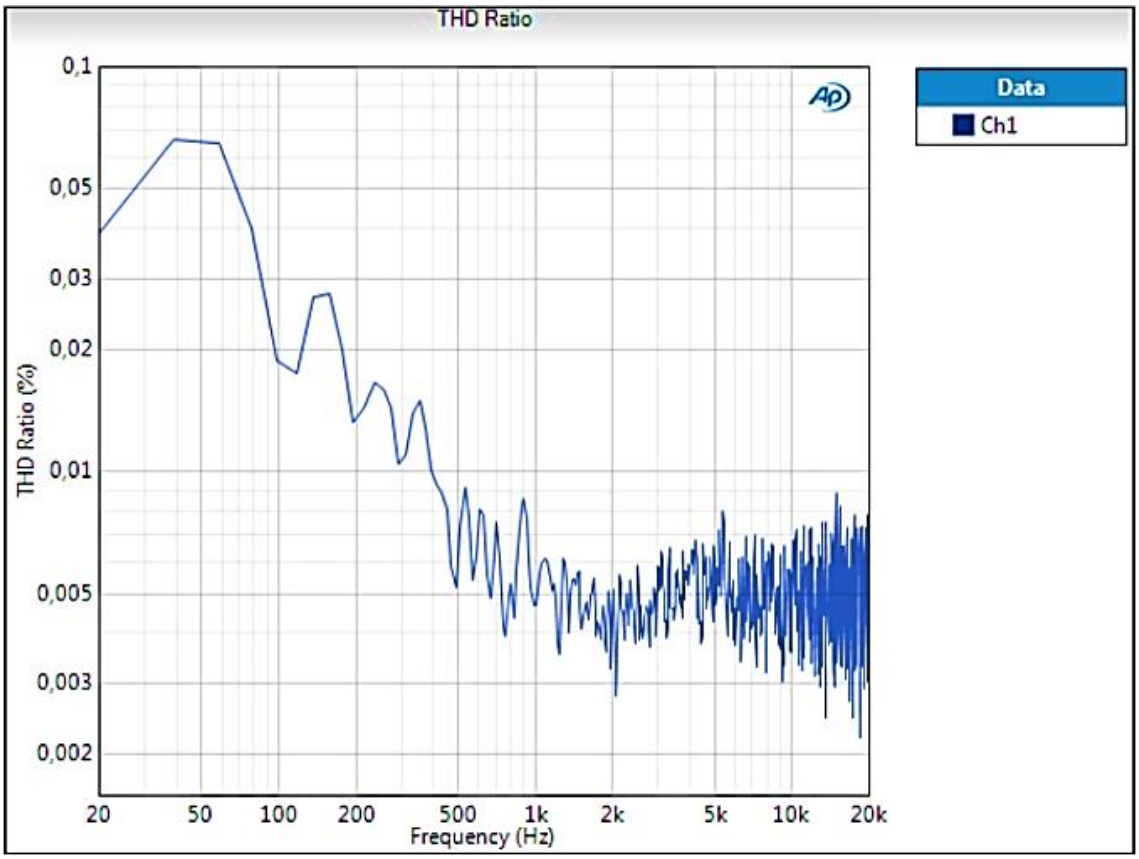
Frekvenční charakteristika při zvolení jedné z hodnot útlumového článku, konkrétně je níže uveden graf při útlumu 20 dB (zbylé útlumy vycházejí obdobně), dochází k výraznému poklesu signálu na vyšších frekvencích. Do 10 kHz charakteristika splňuje cílené parametry, tedy +/- 0,5 dB a i pokles 20 dB vychází správně ač se to tak na první pohled nemusí jevit, jelikož je zde stejně jako v předchozím případě charakteristika posunuta o +6 dB.



Obr. 3.2: Frekvenční charakteristika při útlumu 20 dB

3.1.2 Celkové harmonické zkreslení

Návrhem mělo být dosaženo harmonického zkreslení o hodnotě 0,005 % při 1 kHz. Měřením bylo zjištěno, že návrh tyto parametry splňuje, jak je také možné vidět v grafu níže. Na nižších frekvencích, respektive až po 400 Hz, zkreslení bohužel dosahuje až hodnot kolem 0,05 %. Příčina tohoto nárustu na spodních frekvencích může být zapříčiněna pravděpodobně chybně zvoleným odporem R10. Měl sloužit pro vyrovnání vstupních proudů na operačním zesilovači, ovšem při zapojení využívající TL072 jsou hodnoty proudů tak nízké, že tento odpor ve výsledku může pouze zvyšovat hodnoty šumu.



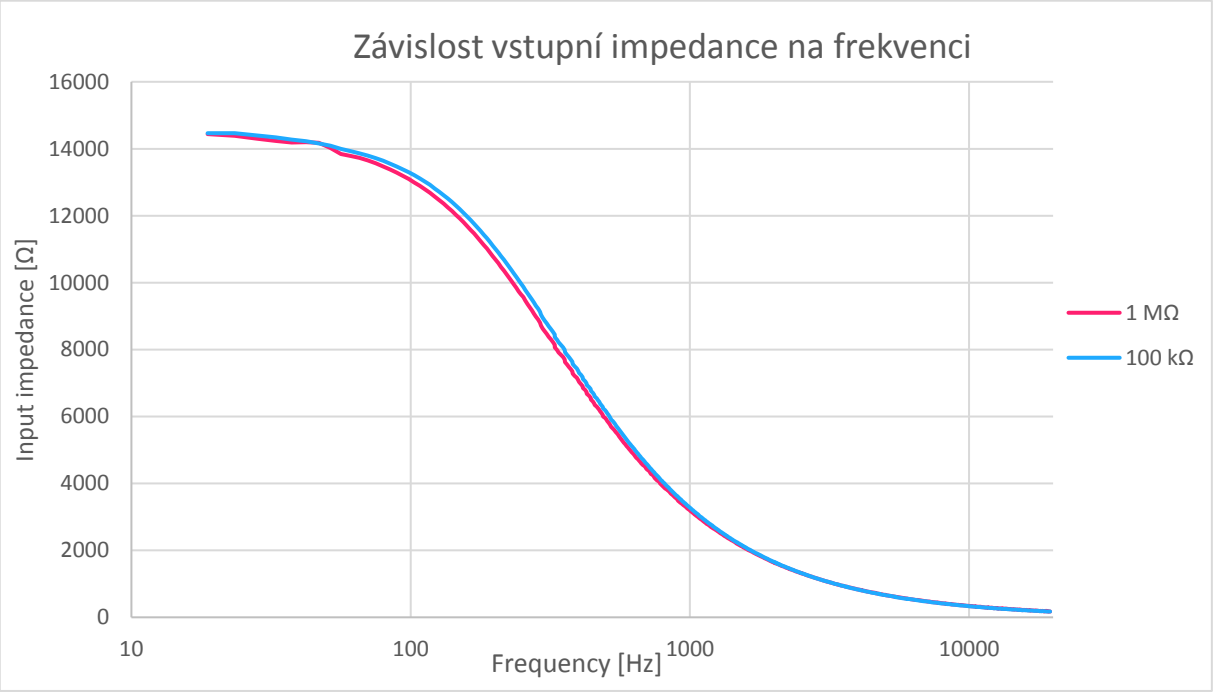
Obr. 3.3: Celkové harmonické zkreslení

3.1.3 Impedance

a) Vstupní impedance

Aby byl vstup DI boxu impedančně přizpůsoben hodnotám pasivních snímačů například elektrické kytary, jaký byl původní záměr využití, bylo zapotřebí dosáhnout hodnot kolem 1 MΩ (opodstatnění viz kapitola 1.2.1.).

Vzhledem k tomu, že APx525 neumožňuje automatizované měření vstupní impedance, bylo zapotřebí změřit napětí na vstupu při sériově zapojeném odporu o známé hodnotě (1 MΩ, 100 kΩ). Z hodnot vstupního napětí bez zátěže, se zátěží a hodnoty samotného odporu tak bylo možné na základě principu odporového děliče vypočítat výslednou vstupní impedanci.



Obr. 3.4: Závislost vstupní impedance na frekvenci

Z grafu na obrázku 3.4 je patrné, že nebylo dosaženo hodnoty 1 MΩ, přičemž výsledky naznačují, že je impedance řízena útlumovým článkem, který se v obvodovém řešení nachází právě před rezistorem hodnoty 1 MΩ, který měl tuto vstupní impedanci určovat. Důvodem tohoto je nesprávné přivedení útlumového článku na zem GND.

Při těchto hodnotách impedance je DI box vhodný spíše pro aktivní elektroniku, jako například syntetizéry, klávesy a podobně.

b) Výstupní impedance

Hodnoty výstupní impedance se na APx525 nepodařilo změřit hned z několika důvodů. Prvním byl fakt, že Audio Precision nenabízí možnost automatizovaného měření výstupní impedance.

Druhou variantou bylo využití obdobného postupu jako u měření vstupní impedance. Změřit tedy napětí na výstupu na prázdno, poté se známou hodnotou zátěže a na základě vztahů založených na principu odporového děliče pak vypočítat hodnoty impedance (měření by se opět muselo provést pro různé frekvence.

Tato druhá varianta rovněž nebyla uskutečnitelná, jelikož problém spočíval v tom, že nebylo možné pro měření využít výstupní TRS konektor (kvůli již zmíněnému stavu prototypu DI boxu), tak aby se zachovalo fantomové napájení přes symetrický XLR výstup.

Nabízela se možnost využít XLR výstup pro změření impedance, pakliže by se DI box napájel za pomoci 9V baterie. To se zdálo jako schůdné řešení, jelikož tuto funkci DI box umožňuje. Při pokusu a tuto metodu měření bylo ale zjištěno, že někde v prototypovém obvodu došlo ke zkratu projevujícího se značným zahříváním baterie a samozřejmě výsledným nenapájením se obvodu.

Aby se tedy dala výstupní impedance změřit, musely by se provést úpravy, které by umožnily alespoň jednu z výše uvedených postupů. Šlo by například o vytvoření nového kusu DI boxu (s kvalitní DPS).

4. ZÁVĚR

Cílem této práce je prozkoumat problematiku DI-boxů a jejich typických parametrů.
První část se věnuje především teoretické stránce problematiky. Ať už se jedná o samotné rozdělení DI-boxů, rozebrání principu, na kterém funguje většina aktivních forem tohoto zařízení, tak jsou zde probrány i důležité parametry a vlastnosti DI-boxu, mezi které patří například zkreslení, šum a mnohé další. V neposlední řadě se tato část zaobírá i stěžejními obvodovými prvky, a to ať už jejich principem fungování, tak i typickými vlastnostmi, dále i doplňkovými funkcemi DI-boxu, které jej kolikrát činí zajímavějším.
Druhá část se zabývá již samotným návrhem aktivního DI-boxu. V prve řadě jsou zde uvedeny parametry, kterých bylo cíleno dosáhnout, a které jsou porovnány s dostupnými modely DI-boxů. Následně jsou v jednotlivých kapitolách samostatně rozebrány stěžejní bloky obvodového řešení, také návrh desky plošných spojů a pro úplnost je v této části popsán i výsledný návrh vyobrazený za pomoci 3D modelu.
Závěrečná část práce se pak již zabývá samotným měřením, kterým byla ověřena funkčnost DI boxu, ale také jeho nedostatky v podobě nižší vstupní impedance, než bylo původně zamýšleno. I přes to je ovšem zařízení funkční, jen se tím změnila jeho výsledná využitelnost. Je tak zde stále prostor pro úpravy, kterými by bylo plně docíleno požadovaných vlastností. Pakliže na závěr porovnáme výsledky s dostupnými DI boxy, jeho originalita spočívá nejen ve využití konektorů, využití operačních zesilovačů, odlišného zdroje napájení či transformátoru o vysoké kvalitě, ale také je cenově dostupnější. Výsledné náklady se při maloobchodních cenách dostaly na hodnotu kolem 2 000 kč. Při úpravách na nedostatcích, které byly měřením zjištěny, by se mohlo jednat o zajímavý DI box.

Literatura

[1] *Radialeng* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://www.radialeng.com/product_category/direct-box

[2] DI Unit. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/DI_unit

[3] SCHIMMEL, Jiří. *Zvuk a zvukové signály: Studiová technika-přednáška*. Brno, 2019.

[4] The history of balanced cables. *Gearslutz.com* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://www.gearslutz.com/board/so-much-gear-so-little-time/166423-history-balanced-cables.html

[5] WHITLOCK, Bill. *Interconnection of balanced and unbalanced equipment*.

[6] *Analog: Training seminars* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-042.pdf

[7] *Problems Occurs in Power Supply Due to Harmonic Distortion* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://www.ijraset.com/fileserve.php?FID=1534

[8] *APTSources* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: http://www.aptsources.com/support/#tab-id-5

[9] *FTE* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: http://www.fte.com/WebHelpII/AES/Content/Documentation/AudioExpertSystemReferenceGuide/PrecisionAndDynamicRange.htm

[10] Šířka pásma. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0%C3%AD%C5%99ka_p%C3%A1sma

[11] WHITAKER, Jerry C. a K. Blair BENSON. *Standard handbook of audio and radio engineering*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2002 ISBN 00-713-8223-2.

[12] *Senzorika* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/218

[13] Elektronický šum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronick%C3%BD_%C5%A1um

[14] BALLOU, Glen. *Handbook for sound engineers: the new audio cyclopedia*. 3rd ed. Boston, Mass.: Focal, 2005. ISBN 02-408-0758-8.

[15] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku II:* ed. České Budějovice: Kopp, 1995. ISBN 80-858-2855-3.

[16] KODEŠ, J., A. KREJČIŘÍK a J. VOBECKÝ. *Elektronika – přednášky, skripta*.

[17] Dělič napětí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/D%C4%9Bli%C4%8D_nap%C4%9Bt%C3%AD

[18] *Zemni smyčky* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://www.zesilovace.cz/co-jsou-zemni-smycky-a-jak-jim-predchazet/

[19] *Sound system interconnection* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://www.academia.edu/34893729/Sound_System_Interconnection

[20] *Groundlift* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://www.zesilovace.cz/symetricke-linky-a-vypinace-zemeni-ground-lift-switches/

[21] *Behringer Ultra-DI* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://images.static-thomann.de/pics/atg/atgdata/document/specs/160358_spec.pdf

[22] *DN100* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: http://www.revolution.pt/pdfs/dn100.pdf

[23] *BSS AR-133* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://www.spfb.be/manuels/BSS.pdf

[24] INSTRUMENTS, Texas. *OPA161x SoundPlus* [online]. In: s. 1-33 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/sbos450c/sbos450c.pdf?ts=1591574431102&ref

[25] INSTRUMENTS, Texas. *TL07xx* [online]. In: s. 1-69 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/slos080n/slos080n.pdf?ts=1591574436393&ref

[26] *Datasheet TL072* [online]. In: [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://www.chipfind.net/datasheet/stmicroelectronics/tl072.htm

[27] MCCORMICK, Tim a Francis RUMSEY. *Sound and Recording: Applications and Theory*. 7th. Focal Press, 2014 ISBN 978-0-415-84337-9.

[28] *Lundahl* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: https://www.lundahltransformers.com/wp-content/uploads/datasheets/1570_0xl.pdf

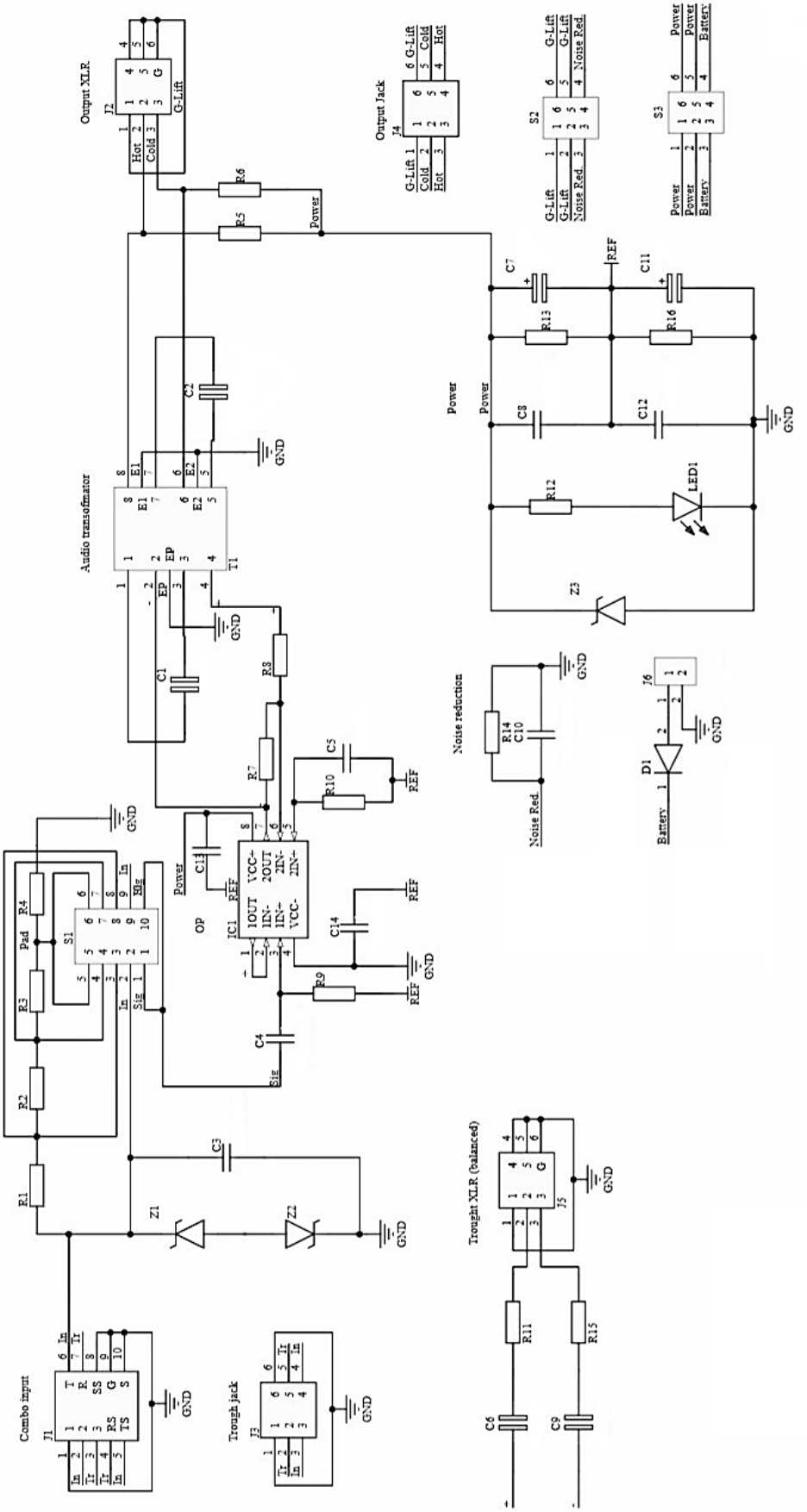
Seznam použitých zkratek, veličin a symbolů

DI	direct injection
Hi-Z	high impedance
ISO	isolator
CMRR	common mode rejection ratio
THD	total harmonic distortion
Γz	činitel odrazu zátěže
Γi	činitel odrazu zdroje
R_z	impedance zdroje
R_i	impedance zátěže
P_z	výkon zdroje
A_D	diferenční zesílení
A_{CM}	zesílení souhlasného signálu
N	šum
C_k	k-tá harmonická složka
Δ_R	dynamická rezerva
L_{MAX}	maximální úroveň signálu
L_{MIN}	minimální úroveň signálu
G	celkové zesílení zařízení
B	šířka pásma
f_H	horní frekvence pásma
f_L	spodní frekvence pásma
A_M	maximální amplituda zesílení
ε_F	elektromotorické napětí
Φ	magnetický indukční tok
N_L	počet závitů cívky
Z	impedance
ρ	rezistivita
ρ_0	počáteční rezistivita
α	teplotní součinitel elektrického odporu
Δt	teplotní rozdíl
U_b	napětí na R_b
A_U	zesílení signálu
U_2=U_{OUT}	výstupní napětí útlumového článku
U_1=U_{IN}	vstupní napětí útlumového článku
R_x	odpor rezistoru x

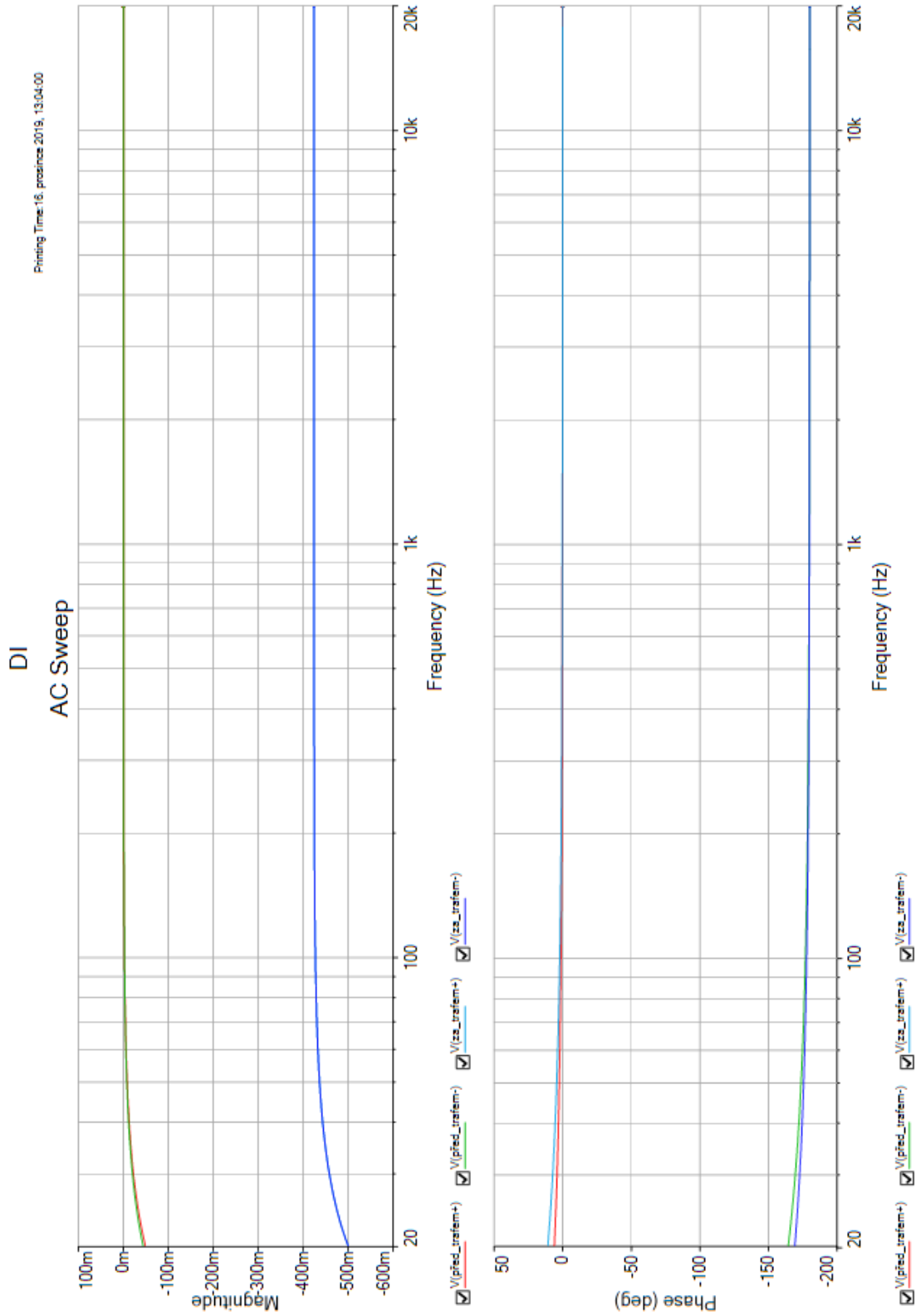
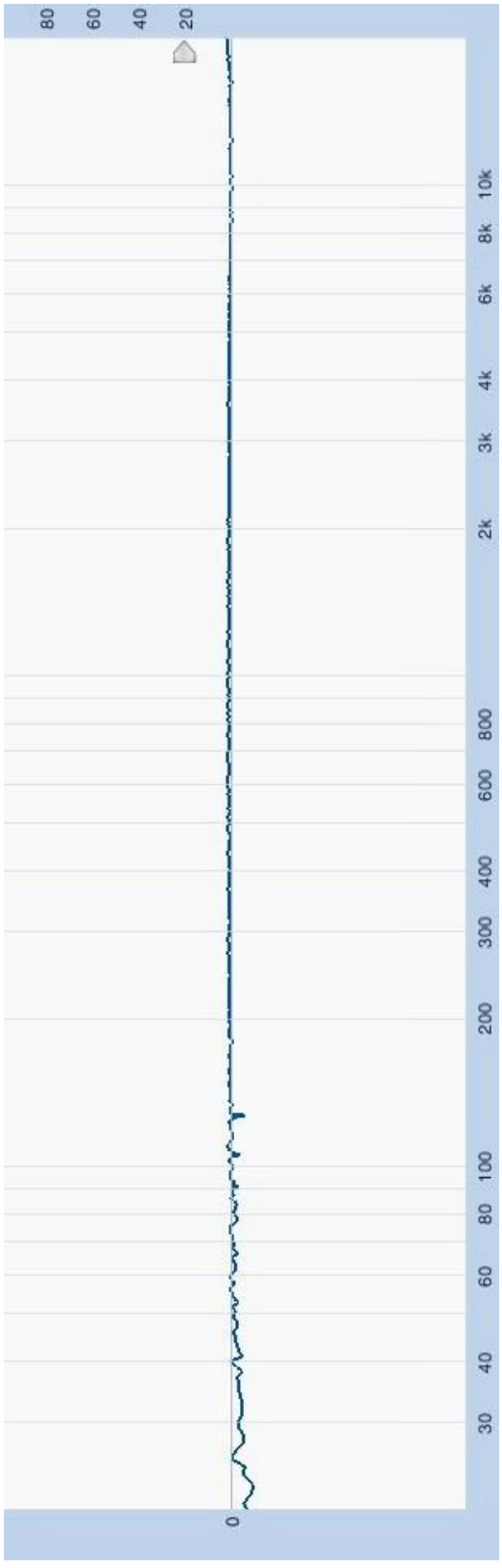
Seznam příloh

Příloha 1 Navrhnuté obvodové schéma DI-boxu 49
Příloha 2 Simulace – frekvenční charakteristika pro útlum 0 dB (Multisim) 50
Příloha 3 Kontrolní měření obvodu nepájivého pole (Smaart) 51

Příloha 1 Navrhnuté obvodové schéma DI-boxu



Příloha 2 Simulace – frekvenční charakteristika pro útlum 0 dB (Multisim)



Příloha 3 Kontrolní měření obvodu nepájivého pole (Smaart)