

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a realizace přepínače audiocest v akustické laboratoři

Autor práce: **Bc. Martin Mixán**
Vedoucí práce: **Ing. Ladislav Zuzjak, Ph.D.**

2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Martin MIXÁN
Osobní číslo:	E22N0011K
Studijní program:	N0714A060017 Aplikovaná elektrotechnika
Téma práce:	Návrh a realizace přepínače audiocest v akustické laboratoři
Zadávací katedra:	Katedra materiálů a technologií

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte možnosti a potřeby propojení audio signálů v akustické laboratoři FEL s ohledem na stávající řešení.
2. Navrhněte vhodný přepínač audio signálů.
3. Přepínač realizujte a změřte jeho parametry.

Rozsah diplomové práce: **30-60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Small Signal Audio Design, Self Douglas, ISBN-13: 978-0415709743
- Shields and Grounds: Safety, Power Mains, Studio, Cable and Equipment, AES, Jour. Audio Eng. Soc., Vol 43, No 5, June 1995
- Sound System Engineering, Davis, Don & Eugene Patronis, ISBN 978-0-240-80830-7

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ladislav Zuzjak, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh a realizaci přepínače audiocest pro akustickou laboratoř Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Cílem je vytvořit zařízení schopné přepínat několik vstupních audio signálů na několik výstupů s minimálním ovlivněním kvality signálu a bez slyšitelných přepínacích efektů. Teoretická část se věnuje analýze klíčových parametrů audio zařízení, jako jsou úroveň signálu, vstupní a výstupní impedance, šum, odstup signálu od šumu, dynamický rozsah, harmonické zkreslení a typy vedení audio signálu. Dále se zabývá vybranými typy zesilovačů, metodami přepínání a směšování signálů, návrhem vstupních, výstupních a dalších obvodů. Praktická část zahrnuje definici požadavků, návrh zapojení a mechanické konstrukce. Součástí je popis navržených obvodů, návrh plošných spojů a mechanické uspořádání zařízení včetně vizualizace předního a zadního panelu.

Klíčová slova

audio přepínač, akustická laboratoř, úroveň signálu, vstupní a výstupní impedance, šum, dynamický rozsah, frekvenční charakteristika, harmonické zkreslení, symetrické a nesymetrické vedení, audio zesilovače, přepínání a směšování signálů

Abstract

This thesis focuses on the design and implementation of an audio path switcher for the acoustic laboratory of the Faculty of Electrical Engineering at the University of West Bohemia in Pilsen. The aim is to create a device capable of switching several input audio signals to multiple outputs with minimal signal quality degradation and without audible switching effects. The theoretical part deals with the analysis of key parameters of audio equipment, such as signal levels, input and output impedance, noise, signal-to-noise ratio, dynamic range, harmonic distortion, and types of audio signal transmission. It also addresses selected types of amplifiers, methods of switching and mixing signals, and the design of input, output, and other circuits. The practical part includes the definition of requirements, the design of the circuitry, and mechanical construction. It contains descriptions of the designed circuits, PCB design, and mechanical arrangement of the device, including visualization of the front and rear panels.

Key Words

audio switcher, acoustic laboratory, signal levels, input and output impedance, noise, dynamic range, frequency characteristics, harmonic distortion, balanced and unbalanced transmission, audio amplifiers, signal switching and mixing

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Teoretický rozbor	- 2 -
1.1 Důležité parametry audio zařízení	- 2 -
1.1.1 Úrovně signálu.....	- 2 -
1.1.2 Vstupní a výstupní impedance.....	- 4 -
1.1.3 Šum.....	- 4 -
1.1.4 Odstup signálu od šumu	- 9 -
1.1.5 Dynamický rozsah	- 9 -
1.1.6 Potlačení stejnosměrné složky.....	- 10 -
1.1.7 Frekvenční a fázová charakteristika	- 11 -
1.1.8 Harmonické zkreslení	- 12 -
1.2 Typy vedení analogového audio signálu	- 12 -
1.2.1 Nesymetrické	- 13 -
1.2.2 Symetrické	- 13 -
1.2.3 Zemní smyčka	- 15 -
1.2.4 Konektory	- 16 -
1.2.5 Možné zapojení konektorů	- 18 -
1.3 Typy zesilovačů.....	- 19 -
1.4 Možnosti přepínání audio signálů	- 21 -
1.4.1 Mechanické přepínače	- 21 -
1.4.2 Přepínání pomocí relé.....	- 22 -
1.4.3 Elektronické přepínání (CMOS, JFET, BJT)	- 23 -
1.4.4 Optoelektrické	- 25 -
1.5 Možnosti směšování audio signálů.....	- 25 -
1.6 Vstupní obvody pro linkové audio signály.....	- 26 -
1.7 Výstupní obvody pro linkové audio signály.....	- 29 -
1.8 Zdroj pro audio zařízení	- 30 -
2 Praktická část.....	- 33 -
2.1 Definice požadavků	- 33 -

2.1.1	Vstupy.....	- 33 -
2.1.2	Výstupy.....	- 33 -
2.1.3	Regulace hlasitosti a další požadavky	- 34 -
2.2	Návrh zapojení.....	- 34 -
2.2.1	Úrovňový diagram.....	- 34 -
2.2.2	Fyzické propojení	- 36 -
2.2.3	Obvod vstupních bloků.....	- 38 -
2.2.4	Obvod výstupních bloků.....	- 44 -
2.2.5	Obvod první části zdroje a zdrojové sběrnice	- 47 -
2.3	Obvod signálové sběrnice.....	- 51 -
2.4	Návrh mechanické konstrukce.....	- 55 -
2.4.1	Návrh předního panelu	- 57 -
2.4.1	Návrh zadního panelu.....	- 57 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 61 -
	Literatura	- 62 -
	Seznam tabulek.....	- 64 -
	Seznam obrázků.....	- 65 -

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a výrobou audio přepínače pro akustickou laboratoř v prostorách Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni (ZČU FEL). Hlavním cílem práce je uspokojit specifické potřeby této laboratoře, kde je nutné přepínat několik audio vstupů na několik výstupů. Vzhledem k náročným akustickým a elektrickým podmínkám, které kladou vysoké nároky na kvalitu zvukového signálu, je důležité, aby navržené zařízení co nejméně ovlivňovalo průchozí signál. Klíčovým požadavkem je přepínání bez praskání, protože frekventované přepínání je jednou z hlavních funkcí zařízení. Přepínač by měl podporovat až 10 vstupních stereo kanálů s možností přepínání na 6 výstupních stereo kanálů. Návrh je realizován v analogové podobě a musí zahrnovat všechny nezbytné funkční bloky pro správnou činnost zařízení, včetně zdroje napájení. Struktura práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část je věnována teoretickému rozboru problematiky, zatímco druhá část je zaměřena na praktický návrh a realizaci samotného zařízení.

1 Teoretický rozbor

V této části práce bude proveden teoretický rozbor dané problematiky, ze kterého bude následně vycházet praktická část.

1.1 Důležité parametry audio zařízení

U zařízení pro audio je potřeba hodnotit několik parametrů, aby bylo možné je kategorizovat a případně i určit jejich kvalitu.

1.1.1 Úrovně signálu

Pro měření úrovně signálu se používají decibely [dB]. Použití decibelů z praktických důvodů zjednodušuje měření zvukového signálu, který se může pohybovat od setin milivoltů až po desítky voltů. Pro vyjádření tohoto poměru se v profesionální zvukové technice používá referenční napětí 0,775 V, značené jako 0 dB. Poměr mezi referenčním napětím a libovolným jiným napětím je vyjádřen v decibelech; například poměr mezi 0,775 V a 1,23 V je +4 dB, zatímco poměr mezi 0,775 V a 0,245 V je -10 dB. V průběhu času se vyvinuly různé způsoby používání decibelové stupnice, jak v profesionální, tak i ve spotřební elektronice. Obecně je úroveň signálu definována vztahem:

$$L = 10 \log \frac{P_x}{P_r} [dB] \quad (1)$$

$$L = 20 \log \frac{U_x}{U_r} [dB] \quad (2)$$

$$L = 20 \log \frac{I_x}{I_r} [dB] \quad (3)$$

kde L je vypočtená úroveň signálu. Proměnné s argumentem x jsou pak naměřené nebo zkoumané hodnoty a proměnné s r jsou referenční neboli vztažné hodnoty pro P jako výkon, U jako napětí, a I jako proud. Hodnoty dB pak mohou mít dodatečné označení jako „u“, „m“, „FS“, „V“ nebo „r“. Toto označení pak závisí na použité referenční hodnotě [1][2].

Hodnoty v dBr

Obecně značí, že se jedná o relativní úroveň, nikoli o absolutní, to znamená, že slouží především k porovnání dvou různých hodnot, ne k výpočtu absolutní hladiny. Toto může být použito například u dBr, kde vztažná hodnota bude jiná než definovaná u dBu a dBm [1][2].

Hodnoty v dBu

Označení dBu je nejběžnější a nejrozšířenější. Písmeno „u“ pochází z anglického slova „unity“ nebo také „unloaded“ a odkazuje na měření audio signálu v jakékoliv impedanci, s referenční úrovní 0,775 V vyjádřenou v decibelech jako dBu, tento neobvyklý hodnotový základ vychází z toho, že poskytuje výkon 1 mW při historické zátěži 600 Ω [1][2].

Hodnoty v dBm

Označení dBm využívá stejnou škálu jako dBu, ale rozdíl je ve způsobu měření. Písmeno „m“ znamená miliwatt a vztahuje se k měření úrovně audio signálu při zátěži 600 ohmů, kde 0,775 V odpovídá výkonu 1 miliwatt [1][2].

Hodnoty v dBFS

U digitálních zařízení se používá dBFS, což znamená „full scale“. Toto označení poukazuje na maximální úroveň signálu, která nesmí být překročena, aby nedošlo ke zkreslení v AD převodnicích, s vrcholovou hodnotou nastavenou na 0 dBFS. Hladina 0 dBFS je většinou nastavena na -18 dBu [1][2].

Hodnoty v dBV

Označení dBV se používá pro měření úrovně signálu v domácích a poloprofesionálních zařízeních, kde referenční úroveň není 0,775 V, ale 1 V. Při optimální úrovni je v těchto zařízeních napětí 0,3 V, což odpovídá -10 dBV. V tomto kontextu je také napětí 1 V považováno za maximální napětí, při kterém zařízení zpracovává signál bez zkreslení. Proto se optimální úroveň signálu v takovém zařízení obvykle nastavuje na přibližně 0,3 V, což odpovídá hodnotě -10 dBV [1][2].

Používané hladiny

V profesionální zvukové technice se jako standardní referenční úroveň používá +4 dBu, což odpovídá efektivnímu napětí 1,23 V pro jakýkoli typ signálu. Pro sinusový signál pak maximální špičkové napětí dosahuje 1,736 V. Signály jsou kategorizovány do tří hlavních skupin podle napěťových úrovní: reproduktorové, linkové a mikrofonní. **Mikrofonní úroveň** je charakteristická pro mikrofony, obvykle se pohybuje od -60 dBu do -20 dBu. **Linková úroveň**, která se v praxi používá na výstupech mikrofonních předzesilovačů a vstupních/výstupních jednotkách dalšího zařízení, jako jsou ekvalizéry a kompresory, se pohybuje od -20 dBu do +30 dBu. **Reproduktorová úroveň**, používaná na výstupech výkonových zesilovačů pro reproduktory, obvykle překračuje +30 dBu [3][4].

1.1.2 Vstupní a výstupní impedance

V současné době se vstupní impedance mikrofonních předzesilovačů typicky pohybuje okolo 2 k Ω a více. Pro optimální přenos signálu mezi mikrofonem a předzesilovačem se doporučuje, aby vstupní impedance předzesilovače byla desetkrát vyšší než výstupní impedance mikrofonu. V profesionálním studiovém prostředí je obvykle akceptovatelný pokles napěťové úrovně o 1 dB při propojení dvou systémů. Dodržení pravidla desetinásobné impedance vede k mírnému poklesu napěťové úrovně o 0,83 dB způsobeného zatížením mikrofonu předzesilovačem [4].

1.1.3 Šum

Šum obecně označuje primárně náhodný šum, který vzniká v odporech a aktivních prvcích. Občas se však stejný termín používá i pro síťový šum, nežádoucí signály z demodulace VF a jiné neobvyklé zdroje, což může vést k nedorozuměním. Proto se ostatní druhy rušení obvykle označují jako "interference". V jednom případě je snaha minimalizovat náhodné variace vznikající přímo v obvodu, zatímco v druhém případě je snaha omezit vnější rušivé signály, přičemž použité techniky se značně liší. V elektronice se pod pojmem šum obvykle rozumí bílý šum, pokud není výslovně specifikován jinak. Tento druh šumu je výsledkem většiny elektronických procesů. Existují dva základní typy šumu, které se objevují ve všech obvodech a zařízeních: „Johnsonův šum“ (Johnson noise) a „výstřelový šum“ (shot noise), oba jsou typy bílého šumu a mají Gaussovské rozložení pravděpodobnosti. Tyto dva mechanismy generují šum jak v bipolárních tranzistorech (BJT), tak v tranzistorech FET, byť různými způsoby. Kromě těchto základních mechanismů existují i další formy šumu, které se vyskytují méně často a nejsou spojeny s bílým spektrem, jako je například šum 1/f (flicker) a popcorn šum [5].

Bílý šum je charakterizován tím, že má konstantní výkon v každém stejně velkém frekvenčním pásmu, měřeno v Hz. To znamená, že množství energie mezi 100 a 200 Hz je stejné jako mezi 1100 a 1200 Hz. Tento druh šumu je typickým produktem většiny elektronických šumových zdrojů [5].

Růžový šum má konstantní výkon v relativně stejných frekvenčních poměrech, takže energie v pásmu 100 až 200 Hz je stejná jako v pásmu 200 až 400 Hz. Jeho energie na jednotku frekvence klesá s každou oktávou o 3 dB. Růžový šum je často využíván v akustických aplikacích, jako je kalibrace místností nebo testování reproduktorů, protože poskytuje rovnoměrnou odezvu na spektrálních analyzátoch s pevně nastavenou šířkou pásma [5].

Červený šum, známý také jako Brownův šum nebo šum náhodné chůze (random-walk noise), vykazuje pokles energie o 6 dB na oktávu, což je dvojnásobek poklesu u růžového šumu. Tento druh šumu je relevantní pro studium stochastických procesů a klimatických modelů, avšak v oblasti zvuku je jeho využití omezené, kromě jeho přítomnosti v oscilačních sekcích analogových syntezátorů. Jméno "Brown" odkazuje na osobu, nikoli na barvu, a souvisí s Brownovým pohybem částic [5].

Fialový šum, někdy nazývaný "diferencovaný bílý šum", vykazuje energii, která s každou oktávou roste o 6 dB. Tento efekt je způsoben frekvenční charakteristikou obvodu, jehož odezva na frekvenci se zvyšuje o 6 dB na oktávu [5].

Šedý šum je modifikovaný růžový šum, který byl upraven psychoakustickou křivkou stejné hlasitosti, typicky používáním inverzní křivky A-váhy. To zajišťuje, že šum je vnímán jako stejně hlasitý na všech frekvencích [5].

Zelený šum skutečně existuje, ale ne v audio spektru [5].

Johnsonův šum je vyvolán přítomností odporu v obvodech, včetně odporů, které jsou uvnitř komponent jako tranzistory. Na rozdíl od toho, takzvané vnitřní odpory, které jsou reprezentací závislosti napětí báze U_{be} na proudu kolektorem I_c, nejsou skutečnými fyzickými odpory a nezpůsobují Johnsonův šum. Je překvapivé, že i přesto, že Johnsonův šum ovlivňuje výkon každého elektronického obvodu, byl tento jev objeven teprve v roce 1928 Johnem B. v Bell Labs. Efektivní amplitudu Johnsonova šumu lze vypočítat podle vztahu:

$$u_n = \sqrt{4kTRB} [V] \quad (4)$$

kde v_n je efektivní hodnota šumového napětí, T je absolutní teplota v kelvinech, B je šířka pásma v Hz, k je Boltzmannova konstanta a R je odpor v ohmech.

Použitá Boltzmannova konstanta je $(1,380662 \cdot 10^{-23})$, nikoli Stefan-Boltzmannova konstanta $(5,67 \cdot 10^{-8})$, která se vztahuje k záření černého tělesa. Napěťový šum se často ponechává ve čtvercovém tvaru pro snadnější sčítání s ostatními zdroji šumu. Tabulka číslo 1 poskytuje představu o tom, jak odpor ovlivňuje velikost Johnsonova šumu při teplotě 25 °C s šířkou pásma 22 kHz. Johnsonův šum není vytvářen reaktancemi obvodu (čistou kapacitou a indukčností). V reálném světě však jalové složky nejsou čisté a například odpory vinutí transformátorů mohou vytvářet významný Johnsonův šum [5].

Tab. 1: Odpor a jejich Johnsonův šum [5]

Odpor [Ω]	Šumové napětí [μV]	Šumové napětí [dBu]	Aplikace
1	0.018	-152.2	Impedance přenosky s pohyblivou cívkou (nízký výstup)
3.3	0.035	-147.0	Impedance přenosky s pohyblivou cívkou (střední výstup)
10	0.060	-142.2	Impedance přenosky s pohyblivou cívkou (vysoký výstup)
47	0.13	-135.5	Izolační rezistor výstupu linky
100	0.19	-132.2	Izolace výstupu zpětnovazební sítě
150	0.23	-130.4	Impedance dynamického mikrofonu
200	0.27	-129.2	Impedance dynamického mikrofonu (starší)
600	0.47	-124.4	Starověká impedance přizpůsobené linky
1000	0.60	-122.2	Pěkné kulaté číslo
2500	0.95	-118.2	Nejhorší případná výstupní impedance potenciometru 10 kΩ
5000	1.35	-115,2	Nejhorší případná výstupní impedance potenciometru 20 kΩ
12,500	2.13	-111.2	Nejhorší případná výstupní impedance potenciometru 50 kΩ
25,000	3.01	-100.2	Nejhorší případná výstupní impedance potenciometru 100 kΩ
1 meg (10 ⁶)	19.0	-92.2	Další pěkné kulaté číslo
1 giga (10 ⁹)	190	-62.2	Používá se v zesilovačích kapacitních mikrofonů
1 tera (10 ¹²)	1900	-32.2	Izolační testery
1 peta (10 ¹⁵)	19,000	-2.2	Na ukázkou

Kondenzátory s jejich vysokými svodovými odpory se blíží ideálu a jejich kapacitní charakter má filtrační efekt. Tyto komponenty obvykle neovlivňují šumové charakteristiky obvodu a v některých případech může být šum snížen použitím kapacitního děliče napětí místo odporového. Šumové napětí je neodmyslitelně spojeno s odporem, proto se ekvivalentní obvod často znázorňuje jako zdroj napětí sériově zapojený s odporem. Přestože se Johnsonův šum obvykle vyjadřuje ve formě napětí, může být také modelován jako šumový proud, použitím Theveninovy-Nortonovy transformace pro získání alternativního ekvivalentního obvodu, kde proudový zdroj je paralelně spojen s odporem. Výpočet šumového proudu se pak jednoduše odvozuje jako Johnsonovo napětí dělené odporem, z něhož šum vychází.

$$i_n = \frac{u_n}{R} [A] \quad (5)$$

kde i_n je šumový proud, v_n je Johnsonovo napětí a R je odpor, který je zdrojem šumu.

Shot noise. Vzhledem k tomu, že elektrický proud je tvořen velkým, avšak konečným počtem elektronů, což znamená, že proud je svou podstatou kvantovaný. Název "Shot noise" vychází z toho, že připomíná zvuk spršky olovených broků dopadajících na kovový buben,

což poukazuje na diskrétní charakter nosičů náboje. Tento šum má spektrum bílého šumu a amplitudu šumového proudu pro daný stálý proud lze popsat rovnicí:

$$i_n = \sqrt{ZqI_{dc}B} [A] \quad (6)$$

kde q je náboj elektronu ($1,602 \cdot 10^{-19} C$), I_{dc} je střední hodnota proudu a B je zkoumaná šířka pásma. Podobně jako u Johnsonova šumu se i Shot noise často vyjadřuje ve formě jeho kvadratické hodnoty, což usnadňuje sčítání s jinými zdroji šumu. Tabulka číslo 2 poskytuje přehled o skutečném vlivu tohoto šumu. S rostoucím proudem se zvyšuje i tento šum, avšak poměrně pomaleji, jelikož je závislý na druhé odmocnině stejnosměrného proudu; to vede k tomu, že procentuální kolísání proudu je menší. Zvláště malé proudy jsou nejhlučnější. Pokud jde o skutečnou úroveň generovaného šumu napětí způsobeného průchodem šumového proudu přes rezistor 100Ω , je relativně nízká, jak dokládá poslední sloupec tabulky. Existuje málo systémů, které by mohl tento dodatečný šum o hodnotě -99 dBu zaskočit, pokud není přímo na vstupu. Pro vytvoření této úrovně šumu by muselo rezistorem o hodnotě 100Ω protékat $1 A$, což by způsobilo pokles napětí o $100 V$ a disipaci $100 W$. Takové podmínky jsou v obvodech předzesilovačů neobvyklé. Ačkoliv Shot noise nelze úplně ignorovat, ve většině případů je možné ho přehlížet, pokud není přítomen v aktivních zařízeních, kde dochází k zesílení šumu [5].

Tab. 2: Jak se šum typu "shot noise" mění s proudem [5]

Proud [DC]	Proudový šum [nA _{rms}]	Fluktuace [%]	R [Ω]	Šumové napětí noise [μV]	Šumové napětí [dBu]
1 pA	0.000084	8.4	100	8.4×10^{-6}	-219.3
1 nA	0.0026	0.27	100	0.000265	-189.3
1 μA	0.084	0.0084	100	0.0084	-159.3
1 mA	2.65	0.00027	100	0.265	-129.3
1 A	84	0.000008	100	8.39	-99.3

Sčítání zdrojů šumu

Při souběhu (součtu) šumů z různých zdrojů se neuplatňuje jednoduché sčítání. To je způsobeno tím, že šumové složky pocházejí z různých zdrojů, kde se odehrávají různé fyzikální procesy, což znamená, že jsou navzájem nekorelované a mohou se částečně vzájemně zesilovat nebo rušit. Správné sčítání tedy probíhá podle střední kvadratické hodnoty (rms), jak ukazuje rovnice číslo 7. Když jsou dva zdroje šumu se stejnou úrovní, celkový přírůstek je 3 dB, nikoli 6 dB. V případě, že se oba zdroje nacházejí ve stejném zařízení, například v bipolárním tranzistoru, je předpoklad o nekorelovanosti méně jistý,

protože mezi nimi může existovat určitá míra korelace. Přesto se zdá, že tato korelace není dostatečně významná, aby způsobila vážné chyby ve výpočtu [5].

Pro součet šumů lze použít vztah:

$$U_{ncelk} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots} [V] \quad (7)$$

kde U_{ncelk} je střední hodnota celkového šumu a U_n^2 jsou pak jednotlivé šumové složky.

Tab. 3: Sčítání nekorelovaných zdrojů šumu [5]

X dB	Y dB	dB sum
0	0	+3.01
0	-1	+2.54
0	-2	+2.12
0	-3	+1.76
0	-4	+1.46
0	-5	+1.19
0	-6	+0.97
0	-10	+0,41
0	-15	+0.14
0	-20	+0,04

Šum předzesilovače

Šumové charakteristiky předzesilovačů se často vyjadřují pomocí parametru ekvivalentního vstupního šumu (EIN), měřeného v jednotkách dBu. Tento parametr se většinou určuje při maximálním nastavení zisku, a v profesionální studiové technice obvykle dosahuje hodnot kolem -125 dBu. Je důležité specifikovat zisk, při kterém byl šum měřen, protože bez této informace mohou být údaje zavádějící. Výrobci někdy udávají EIN při zisku 0 dB, což znamená, že skutečná měřená hodnota šumu byla upravena o hodnotu zisku. Běžným měřicím postupem je například předzesilovač s maximálním ziskem 65 dB a EIN -125 dBu, kde při maximálním zisku byla měřená úroveň šumu -60 dBu. Po odečtení zisku 65 dB od měřené hodnoty šumu je EIN -125 dBu. Výrobci uvádějí šum při maximálním zisku, protože to vede k nejlepším relativním výsledkům. Při měření EIN se podle IEC 60268-3 v Evropě používá impedance 200 ohmů a v USA 150 ohmů, což by také mělo být specifikováno u každého měření. Velikost připojené impedance ovlivňuje výsledky měření, přičemž nižší impedance typicky snižuje úroveň šumu. Například rozdíl mezi 200 ohm a 150 ohm může vést ke změně úrovně šumového napětí o 1,4 dB. Tepelný šum rezistoru lze vypočítat podle rovnice uvedené výše. Například pro slyšitelné spektrum od 20 Hz do 20 kHz při 20 °C

a impedanci 200 ohmů by šumové napětí bylo 0,254 μV , což odpovídá -129,69 dBu. Příklad výpočtu dle výše popsaných vztahů je následující:

$$u_n = \sqrt{4kTRB} = \sqrt{4 \cdot (1,3806504 \cdot 10^{-23}) \cdot (273,15 + 20) \cdot 200 \cdot (20000 - 20)} = 0,254 \mu\text{V} \quad (8)$$

$$L_u = 20 \log \frac{0,254 \cdot 10^{-6}}{0,775} = -129,69 \text{ dBu} \quad (9)$$

To znamená, že pokud je na vstup předzesilovače připojena impedance 200 ohmů, výsledný EIN by měl být vyšší než -129,69 dBu. Teplota ovlivňuje úroveň šumu, přičemž nižší teplota snižuje a vyšší zvyšuje úroveň šumu. Pro optimální kombinaci zařízení a předzesilovače je užitečné srovnat úroveň vlastního šumu zařízení a předzesilovače. Pokud má zařízení šum -112 dBu a šum předzesilovače je o 10 dB nižší, celková úroveň šumu bude -122,4 dBu, s celkovým nárůstem šumu o +0,4 dB na výstupu [4][5].

1.1.4 Odstup signálu od šumu

Odstup signálu od šumu neboli „signal to noise ratio“ (SNR nebo S/N) je míra, která srovnává úroveň užitečného signálu s úrovní šumu. SNR je definován jako poměr výkonu signálu k výkonu šumu, a také se často vyjadřuje v decibelech. Poměr vyšší než 1:1 (více než 0 dB) znamená, že výkon signálu převyšuje úroveň šumu. Vysoký SNR znamená, že signál je čistý a snadno detekovatelný či interpretovatelný, zatímco nízký SNR naznačuje, že signál je znehodnocen nebo zakryt šumem a může být obtížné ho rozlišit nebo dále zpracovat. SNR lze vylepšit zvýšením výkonu užitečného signálu, nebo snížením úrovně šumu. Vztah pro výpočet je následující:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} [dB] \quad (10)$$

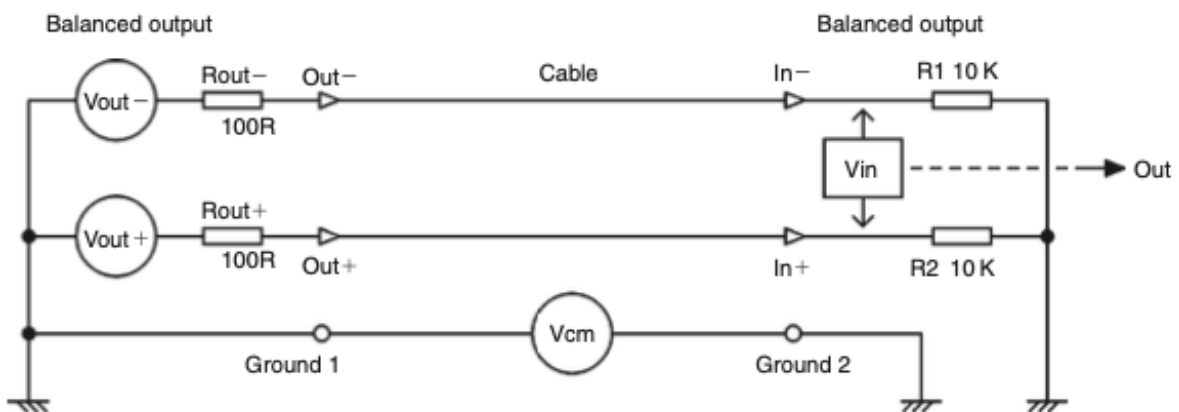
kde P_s je výkon signálu a P_n je výkon šumu [4][5][6].

1.1.5 Dynamický rozsah

Pro zpracování zvuku bez ztráty kvality musí mít zařízení dynamický rozsah alespoň tak velký, jako je dynamický rozsah zvuku, který se má zpracovat. Dynamický rozsah je definován jako poměr maximálního akustického tlaku a vlastního šumu. Správné nastavení zisku v řetězci slouží k minimalizaci šumu na výstupu a zajištění dostatečné rezervy pro signálové špičky bez zkreslení. Příliš slabý signál vede k vyššímu podílu šumu v užitečném signálu, zatímco příliš silný signál může způsobit zkreslení [4][5].

1.1.6 Potlačení stejnosměrné složky

Základní symetrické propojení se skládá ze dvou rezistorů a standardního diferenciálního zesilovače. Předpokládá se, že symetrický výstup na zdrojovém zařízení má dva identické výstupní odpory a přijímací zařízení má dva stejné vstupní odpory. Diferenciální vstupní zesilovač detekuje napětí mezi vodiči „HOT“ a „COLD“ a ideálně úplně potlačuje společné napětí přítomné na obou vstupních bodech. Schopnost zesilovače potlačovat společné napětí se označuje jako odrušovací poměr stejnosměrného režimu „common-mode rejection“ (CMRR) a měří se v decibelech. Například, pokud diferenciální vstupní napětí mezi vstupy vyprodukuje výstupní napětí 0 dB a následně, pokud jsou vstupy propojeny a je k nim přivedeno stejné napětí jako k zemi, ideální výstup by byl nulový. Ve skutečnosti může výstup, díky nedokonalostem oscilovat od 20 dB (u špatného symetrického propojení) až po 140 dB (u velmi kvalitního propojení). Symetrická audio připojení mají v jednom ohledu výhodu. Společný signál je obvykle mnohem nižší než úroveň nežádoucího šumu, což znamená, že rozsah stejnosměrného napětí na vstupu obvykle nepředstavuje problém. Pro dosažení dobrého CMRR je klíčové správné nastavení vstupních a výstupních odporů.



Obr. 1: Symetrické propojení ukazující vlivy na CMRR (Common-Mode Rejection Ratio) [5].

Když jsou všechny čtyři odpory přesně na svých nominálních hodnotách, dosahuje CMRR teoreticky nekonečna. Pokud se hodnota jednoho z rezistorů změní o 1 %, CMRR klesne na 80 dB a při odchylce 10 % klesne na 60 dB, další hodnoty jsou uvedeny v tabulce číslo 4. To jsou na první pohled přijatelné hodnoty, ale v reálném světě, kde každý odpor má svou toleranci, je tato situace méně ideální. Je potřeba se soustředit na to, aby oba odporové děliče měly stejný útlum. Zvýšením poměru mezi výstupním a vstupním odporem, buď snížením prvního nebo zvýšením druhého, se útlum přiblíží k ideálu a změny v hodnotách obou odporů budou mít menší vliv. Pokud se například zvýší vstupní impedanci na 100 k Ω , situace se zlepší desetinásobně, protože poměr R_{in}/R_{out} se zlepší ze 100 na 1000krát. Tím se

dosáhne 100 dB pro 1 % odchylku a 80 dB pro 10 % odchylku. Pokud by vstupní impedance byla 1 M Ω , poměr R_{in}/R_{out} by vzrostl na 10 000 a CMRR by dosáhl 120 dB pro 1% odchylku a 100 dB pro 10% odchylku [5].

Tab. 4: Jak tolerance rezistorů ovlivňují teoretický CMRR [5]

R_{out+}	R_{out-}	R_{out} odchylka	R1	R2	R1, R2 odchylka	R_{in}/R_{out} ratio	CMRR (dB)
100	100	0	10k	10k	0	100	Infinity
100	101	10%	10k	10k	0	100	-80.2
100	110	10%	10k	10k	0	100	-60.2
100	100	0	10k	10.1k	1%	100	-80.3
100	100	0	10k	11k	10%	100	-61.0
100	100	0	100k	101k	1%	1000	-100.1
100	100	0	100k	110k	10%	1000	-80.8
100	100	0	1M	1.01 M	1%	10,000	-120.1
100	100	0	1M	1.1M	10%	10,000	-100.8
68	68	0	20k	20.2k	1%	294	-89.5
68	68	0	20k	22k	10%	294	-70.3

Další možností je snížení výstupní impedance na 10 Ω , při ignorování otázky týkající se v ∞ stability způsobené kapacitou kabelů, se vstupní impedancí 100 k Ω . To by, jak se dá očekávat, opět poskytlo 120 dB pro 1 % odchylku a 100 dB pro 10 % odchylku. Běžně se v praxi používá s kombinace výstupních odporů 68 Ω a vstupních impedancí 20 k Ω . Rezistory 68 Ω jsou přibližně nejnižší hodnoty, které je možné použít bez riskování v ∞ stability. Vstupní impedance 20 k Ω je dosažena použitím čtyř 10 k Ω rezistorů v základním symetrickém vstupním zesilovači. Tato kombinace poskytuje CMRR 89,5 dB pro 1% odchylku, což je velmi dobrý výsledek. Tato data jsou shrnuta v číslo 4. Závěrem, ideální je dosáhnout co nejnižší výstupní impedance a co nejvyšší vstupní impedance pro maximální odrušení stejnosměrného rušení. To je klíčové, neboť nízká výstupní impedance je nezbytná pro použití více zesilovačů a kapacitních vstupů, zatímco vysoká vstupní impedance je důležitá pro minimalizaci zatížení [7].

1.1.7 Frekvenční a fázová charakteristika

Frekvenční amplitudová charakteristika zobrazuje vliv systému na zpracovávaný signál. Udává se, že lidské ucho slyší na spektru od 20 Hz do 20 kHz, v závislosti na věku a dalším okolnostem, tato hodnota se také mění v čase. S ohledem na tento frekvenční rozsah je potřeba, aby zařízení, kterými prochází audio signál byly v tomto frekvenčním pásmu co

nejvíce koherentní, ideálně neměnné pro všechny frekvence. V případě požadavku na nulovou změnu úrovně signálu by přenos audio zařízení pro přepínání měl mít zisk 0 dB v celém frekvenčním pásmu. Stejně tak u fázové charakteristiky, by ideální zařízení mělo mít naprosto plochou fázovou charakteristiku v celém pásmu.

1.1.8 Harmonické zkreslení

Harmonické frekvence periodického napětí nebo proudu jsou frekvenční složky signálu, které jsou celočíselnými násobky frekvence hlavního signálu. Toto je základní výsledek Fourierovy analýzy periodického signálu. Harmonické zkreslení je zkreslení signálu způsobené těmito harmonickými složkami. Napětí nebo proud, který je čistě sinusový, nemá harmonické zkreslení, protože se jedná o signál sestávající z jediné frekvence. Napětí nebo proud, který je periodický, ale ne čistě sinusový, bude mít vyšší frekvenční složky, které přispívají k harmonickému zkreslení signálu. Obecně platí, že čím méně periodický signál připomíná sinus, tím větší jsou harmonické složky a tím větší je harmonické zkreslení. Čistě sinusový signál tedy nemá zkreslení. Ve skutečnosti nejsou sinusové napětí a proudy dokonale sinusové; vždy bude přítomno nějaké harmonické zkreslení. Harmonické zkreslení je snadno viditelné při zkoumání časových a frekvenčních reprezentací čtvercové vlny. Je však také důležité umět kvantifikovat harmonické zkreslení. THD (Total Harmonic Distortion) je definováno jako poměr ekvivalentního efektivního (RMS) napětí všech harmonických frekvencí (od druhé harmonické dále) k RMS napětí základní frekvence. THD lze spočítat pomocí následujícího vztahu (v této rovnici je použito napětí, ale místo něj by mohl být použit proud):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{n-rms}^2}}{U_{1rms}} [dB] \quad (11)$$

kde U_n jsou jednotlivé harmonické složky a U_1 je základní harmonická.

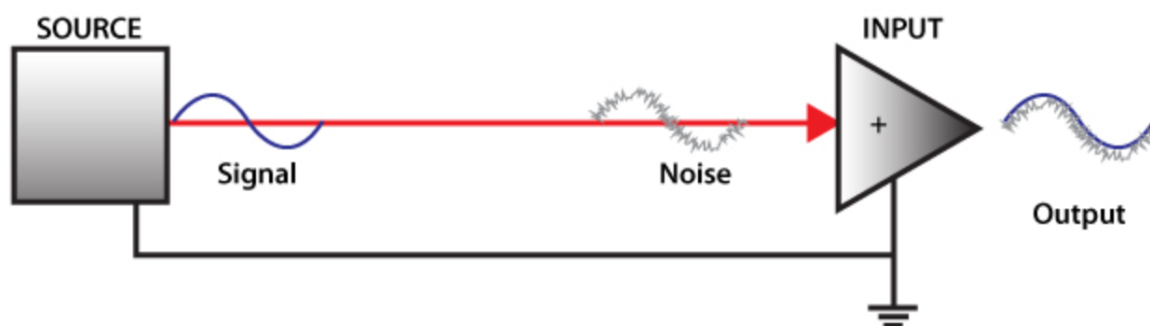
1.2 Typy vedení analogového audio signálu

S ohledem na okolní elektromagnetické rušení je podstatné, jakým způsobem je audio signál přenášen z bodu A do bodu B. Výběr vhodného typu také závisí na celkové vzdálenosti přenosové cesty a na napěťové úrovni zdroje. Nejčastější v praxi používané vedení pro audio signál je nesymetrické (dvouvodičové) nebo symetrické (třívodičové) vedení. Nejčastěji používané konektory pro vedení audiosignálu v profesionálním použití jsou konektory tři pinové XLR nebo JACK s průměrem 6,3 mm nebo 3,5 mm. Ustupujícím konektorem

z profesionálního audio použití, ale často používaným například u domácího audia či HI-FI audia zařízení je konektor RCA (cinch).

1.2.1 Nesymetrické

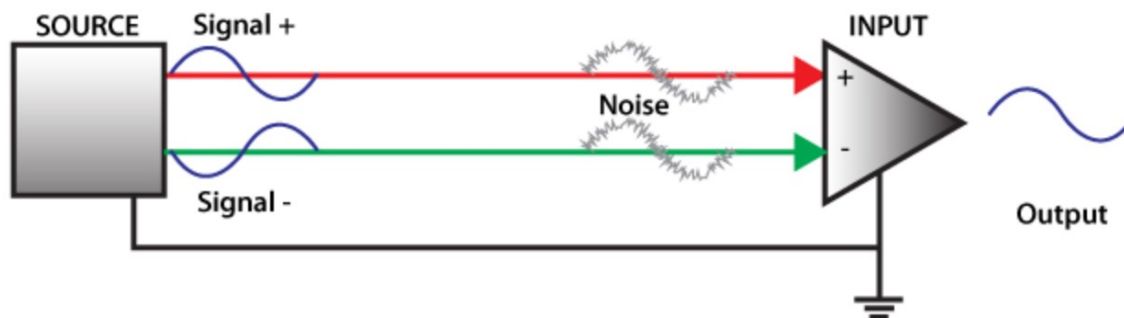
Nesymetrické vedení využívá dvou vodičů, kdy jeden z vodičů je nazýván „HOT“, na kterém je užitečný elektrický potenciál (audio signál) a druhý nazývaný GND (ground), který je stínící, zemnicí, a na kterém by mělo být nulové napětí. Toto vedení audio signálu se využívá převážně na krátké vzdálenosti na desítky centimetrů až jednotky metrů a převážně pro audio zdroje s vyšší napěťovou hladinou, na linkové úrovni. Toto vedení má podstatné nedostatky, přestože je signál s užitečným signálem stíněn, i tak projde elektromagnetické rušení skrz a na užitečný signál se toto rušení superponuje (přičte). Velikost a charakter rušení se může měnit na místě použití v závislosti na místních elektromagnetických podmínkách. Pokud je rušivý signál dostatečně velký k poměru užitečnému signálu, může se užitečný signál stát nepoužitelným i z toho důvodu, že při zesílení signálu se zesílí také indukované rušení [8].



Obr. 2: Princip rušení u nesymetrického vedení [8]

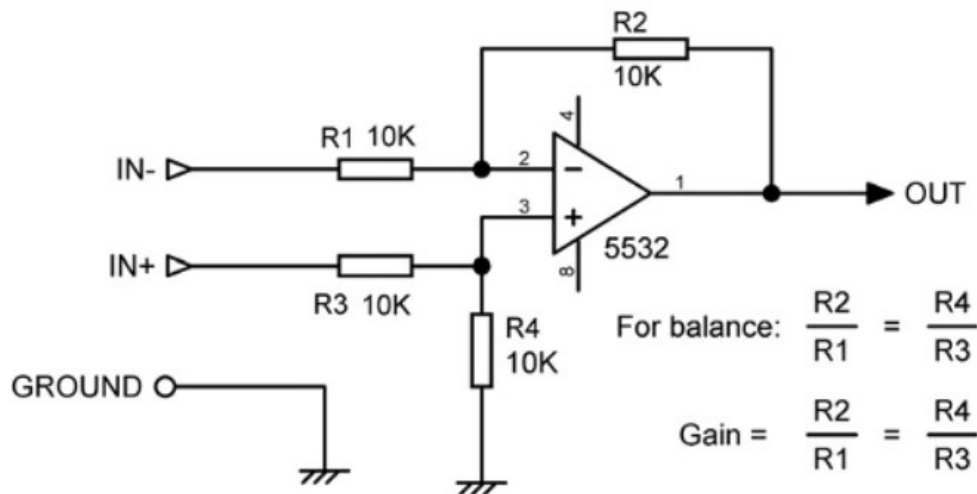
1.2.2 Symetrické

Symetrické vedení oproti nesymetrickému přidává další vodič s názvem „COLD“. Do tohoto vodiče se použije stejný signál jako do vodiče „HOT“, avšak s opačnou polaritou. Teorie je taková, že díky souběžnému vedení vodičů se rušení naindukují k užitečnému signálu ve stejném smyslu. Pokud se na konci vedení tyto dva signály sečtou, z nichž jednomu se před sečtením otočí polarita, dojde tak k odečtení naindukovaného rušení a sečtení užitečného signálu, jelikož užitečný signál má po otočení stejnou polaritu a rušení teoreticky ideálně opačnou. Tento typ vedení se používá ve většině aplikací, je také vhodný na nižší napěťové úrovni a delší vzdálenosti desítek či stovek metrů.



Obr. 3: Princip rušení u symetrického vedení [8]

Symetrické připojení se nejčastěji realizuje pomocí konektorů XLR, což je profesionální tří pinový formát. Další běžně používanou alternativou k XLR jsou stereofonní TRS Jack konektory, které se často využívají pro linkové signály v nahrávacích studiích a lze je najít na zadní straně profesionálních výkonových zesilovačů vedle XLR konektorů. Jack konektory mohou být vybaveny přepínacími kontakty, které umožňují deaktivovat XLR vstupy a tím zabránit vstupu šumu. Mnoho zařízení, včetně předzesilovačů a výkonových zesilovačů, je vybaveno jak nesymetrickými, tak symetrickými vstupy a výstupy. Symetrické propojení je možné realizovat buď pomocí transformátoru, nebo elektronicky. Elektronicky to přináší řadu výhod, jako jsou nízké náklady, kompaktní rozměry a hmotnost, výbornou frekvenční a přechodovou odezvu a dobré zacházení s nízkofrekvenční linearitou. Ačkoliv je někdy považováno za druhořadé řešení, jeho výkonnost je pro většinu profesionálních aplikací více než postačující. Symetrizace pomocí transformátoru má také své specifické přednosti, obzvláště ve vysoce zarušeném prostředí, ale současně přináší i značné nevýhody. Transformátory jsou odolné vůči elektrickým poruchám, mají konzistentně vysoký CMRR a nepotřebují žádnou dodatečnou energii. Na druhé straně mohou produkovat nízkofrekvenční zkreslení, obzvláště pokud jsou konstruovány co nejmenší, aby se snížily náklady a hmotnost. Může se u nich vyskytnout také problematická vysokofrekvenční odezva kvůli svodové reaktanci a distribuované kapacitě, a navíc jsou nevyhnutelně těžší a dražší ve srovnání s jakýmkoli elektronickým řešením. Některé z těchto problémů lze řešit pomocí dodatečných elektronických obvodů, ale některé nikoli.



Obr. 4: Základní zapojení symetrického vstupního zesilovače [5]

Obrázek číslo 4 představuje základní symetrický vstupní zesilovač s jedním operačním zesilovačem. Pro dosažení vyváženosti je nezbytné, aby rezistor R1 byl stejný jako R3 a R2 stejný jako R4. Tento zesilovač má zesílení určené poměrem $R2/R1$ (stejně jako $R4/R3$). Zatímco standardní symetrický nebo diferenciální zesilovač s jedním operačním zesilovačem je běžně používaný obvod, jeho chování může být někdy neintuitivní. Jeho vstupní impedance se při napájení ze symetrického zdroje neshodují. Problém s jednoduchými diferenciálními zesilovači spočívá v tom, že interakce mezi oběma vstupy vede k tomu, že vstupní impedance na „COLD“ vstupu je silně ovlivněna signálem na „HOT“ vstupu. Měření vstupní impedance je možné pouze přivedením signálu a měřením proudu, který protéká do vstupu, což znamená, že zdánlivá vstupní impedance se na obou vstupech mění v závislosti na řízení vstupů [5][7].

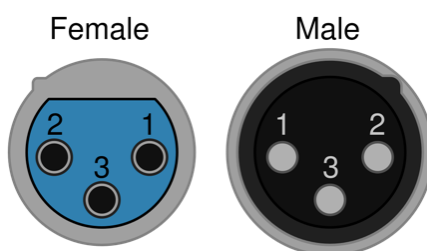
1.2.3 Zemní smyčka

Zemní smyčka se vytvoří, když jsou dvě nebo více zařízení napájená ze sítě vzájemně propojena, což umožňuje proudění střídavého proudu přes stínění a zemnicí vodiče, což má za následek zvýšení šumové hladiny v systému. Tento problém je nejvýraznější, když jsou zařízení spojena jak přes síťovou zem, tak i audio kabely, což se obecně označuje jako "zemní smyčka". Přesto mohou zemní proudy působit i v systémech, které nejsou galvanicky uzemněny, i když jsou tyto proudy slabší, stále mohou negativně ovlivnit šumovou hladinu. Zemní proudy mohou pocházet přímo z napájecích sítí nebo mohou být generovány zařízeními v rámci audiosystému. Tyto proudy procházející zemněním způsobují poklesy napětí, které se projevují jako brum nebo bzučení. Toto může nastat jak v audio propojeních, tak uvnitř zařízení, pokud nejsou správně navržena [5][7].

1.2.4 Konektory

XLR

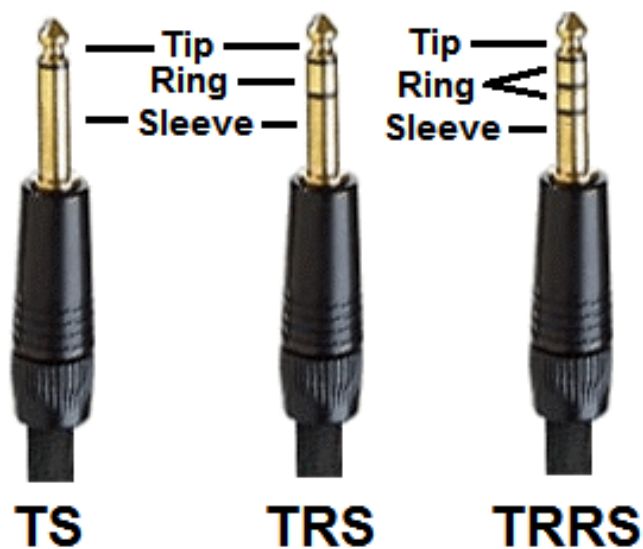
Tento konektor je nejpoužívanější v profesionální audio technice pro symetrické propojení dvou zařízení. Používá se pro mikrofonní i linkové úrovně signálu. U XLR konektorů je pin 2 „HOT“ nebo (+), pin 3 „COLD“ nebo (-) a pin 1 je „GND“ nebo „GROUND“ a slouží jako zem [9].



Obr. 5: Vizualizace XLR konektoru [9]

JACK

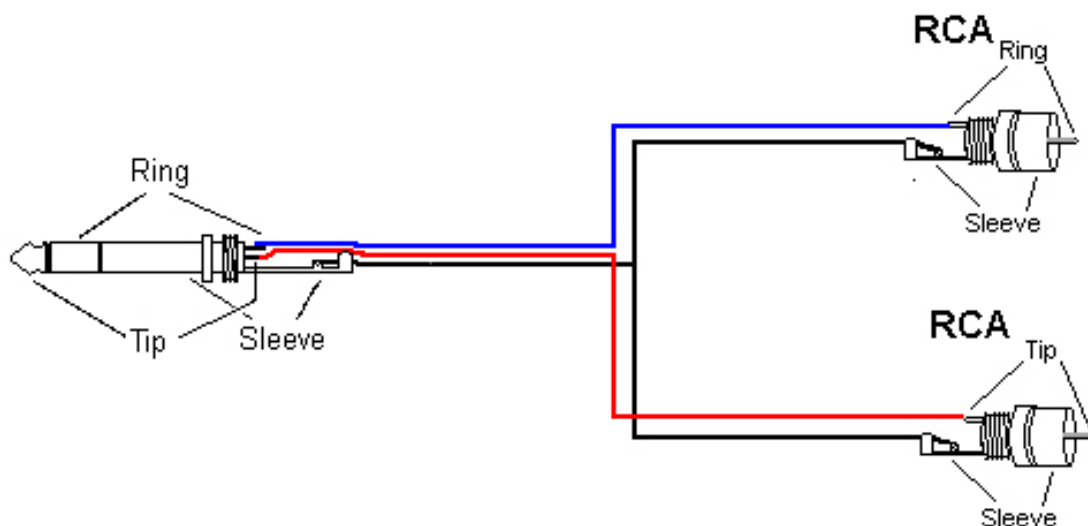
Konektory typu JACK at' už ve verzi 6,3 mm nebo 3,5 mm jsou primárně dvojího typu. Typu TS a TRS, kdy zkratky označují počet kontaktů konektoru. TS znamená Tip (špička) a Sleeve (objímka), u druhého typu je pak navíc Ring (kroužek). Další typy mohou mít více kroužků, které mohou být u 3,5 mm JACKU například pro mikrofon. Obecně se pro označení dle zapojení používá pro konektor TS „nesymetrický“ nebo „mono“ a pro TRS „symetrický“ nebo „stereo“. Mono znamená, že se jedná o jeden audio kanál, stereo jsou pak audio kanály dva [10].



Obr. 6: Srovnání TS, TRS a TRRS Jack konektoru [10]

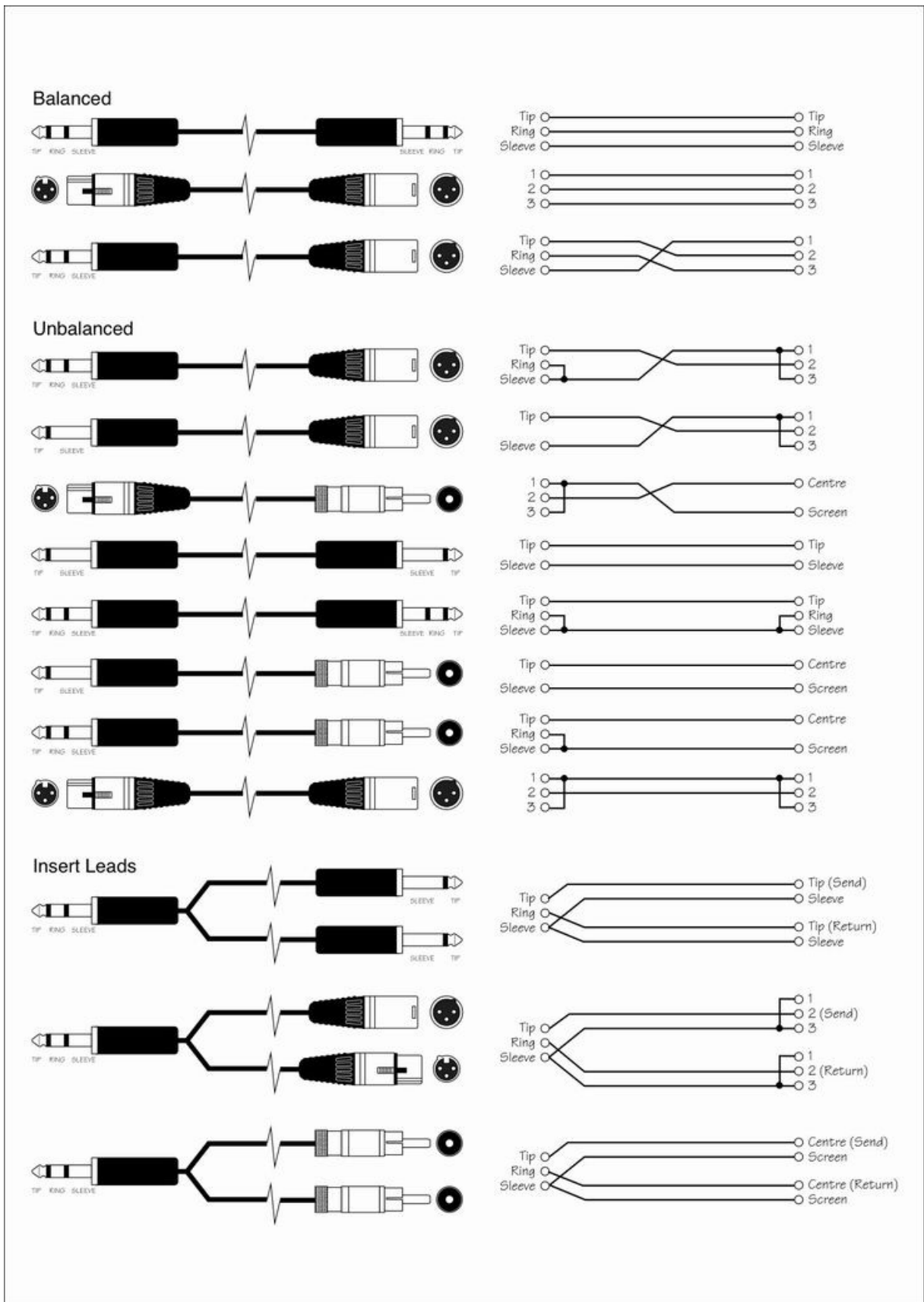
RCA

RCA konektor je typ elektrického konektoru, který se používá pro přenos audio a video signálů. Název RCA pochází od společnosti Radio Corporation of America, která tento design uvedla na trh ve 30. letech. Samčí a samičí části konektoru se nazývají RCA konektor a RCA zdířka. Tento konektor je také označován jako RCA phono konektor nebo jednoduše phono konektor. Slovo "phono" ve phono konektoru je zkratkou slova "fonograf", protože tento konektor byl původně vytvořen pro připojení fonografu k rádiovému přijímači. Dále se konektor nazývá také „cinch“ jako zkratka pro chicagského výrobce Cinch pro tento typ konektoru a zásuvky. Phono konektory mají nedostatek, že při připojování k aktivnímu systému, což se nedoporučuje (přesto se to často děje), dochází k předčasnému spojení signálových kontaktů před zemnicími, což může způsobovat nežádoucí zvuky [11].



Obr. 7: Princip RCA konektoru [12]

1.2.5 Možné zapojení konektorů



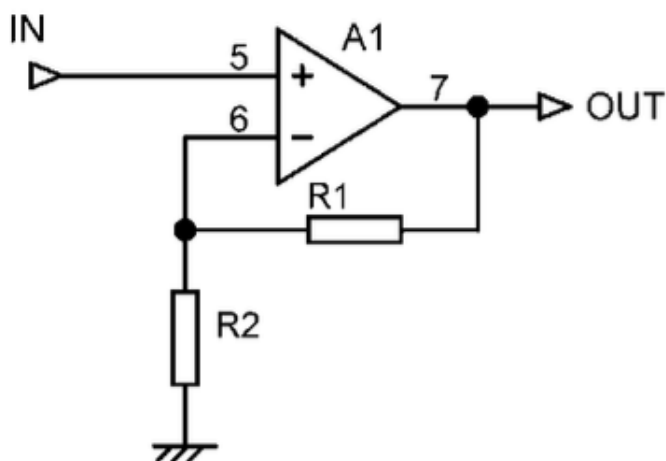
Obr. 8: Možnosti symetrického a nesymetrického zapojení různých typů konektorů a zapojení insertních kabelů [13]

1.3 Typy zesilovačů

Na nejzákladnější úrovni existují čtyři typy zesilovačů, protože existují dva typy signálů (napětí a proud) a dva typy portů (vstup a výstup). Termín "port" zde zjednodušuje, zda je vstup nebo výstup diferenciální nebo jednopólový [5].

Napět'ové zesilovače

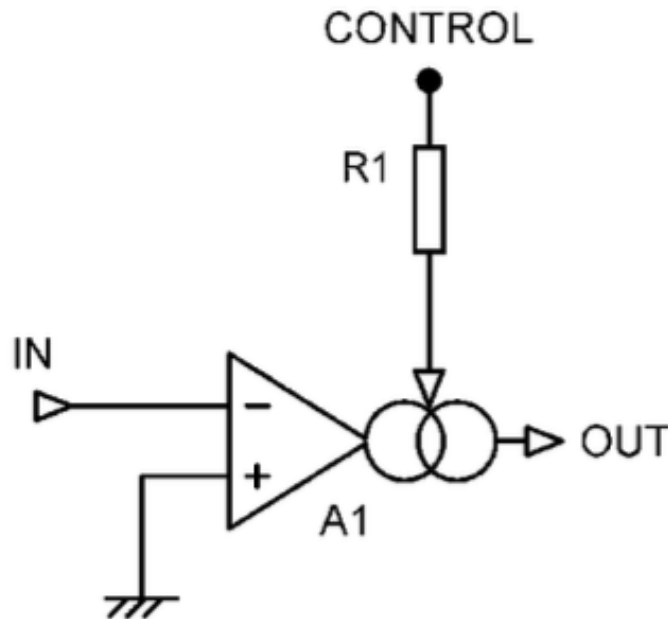
Napět'ové zesilovače tvoří naprostou většinu zesilovačů. Přijímají napět'ový vstup s vysokou impedancí a poskytují napět'ový výstup s nízkou impedancí. Všechny konvenční operační zesilovače jsou samy o sobě napět'ovými zesilovači, ale pomocí vhodných zpětnovazebních spojení mohou být upraveny tak, aby fungovaly jako jakýkoli ze čtyř typů zesilovačů. Obrázek číslo 9 ukazuje napět'ový zesilovač s vysokým zesílením a sériovou napět'ovou zpětnou vazbou. Zisk v uzavřené smyčce je pak $\frac{R_1+R_2}{R_2}$ [5].



Obr. 9: Napět'ový neinvertující zesilovač [5]

Transkonduktanční zesilovače

Tento název znamená, že napět'ový vstup (obvykle diferenciální) je převeden na proudový výstup. Má přenosový poměr $A = \frac{I_{out}}{U_{in}}$, což jsou rozměry $\frac{I[A]}{U[V]}$ neboli vodivost, takže je označován jako transkonduktanční nebo méně často transadmitanční zesilovač. Je možné vytvořit velmi jednoduchý, i když ne příliš lineární, napět'ově řízený zesilovač pomocí transkonduktanční technologie: diferenciální vstupní operační transkonduktanční zesilovač (OTA). Integrované obvody (IC) mají přídatný pin, který poskytuje napět'ové řízení transkonduktance, což při použití bez záporné zpětné vazby umožňuje řízení zesílení [5].

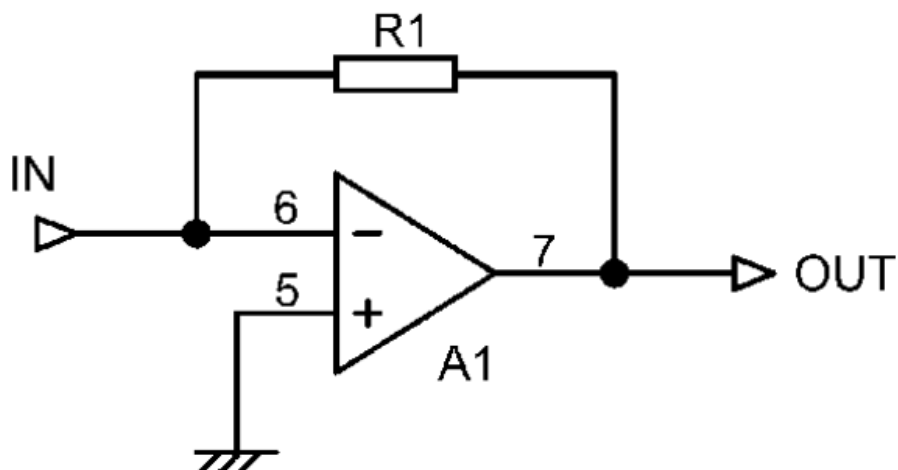


Obr. 10: Transkonduktanční zesilovač [5]

Transimpedanční zesilovače

Transimpedanční zesilovač přijímá proudový vstup (obvykle jednopólový) a poskytuje napět'ový výstup. Někdy se nazývá I-U převodník. Má přenosový poměr $A = \frac{U_{out}}{I_{in}}$, což jsou rozměry $\frac{U [V]}{I [A]}$ neboli odpor. Proto se nazývá transimpedanční nebo transresistanční zesilovač.

Transimpedanční zesilovače se obvykle vyrábějí aplikací napět'ové zpětné vazby na vysoko ziskový napět'ový zesilovač. Důležitý je jako virtuálně zemní sumační zesilovač v mixážních konzolích. Napět'ový zesilovací stupeň ve většině výkonových zesilovačů je transimpedanční zesilovač. Používají se pro I-U konverzi při připojení k digitálně-analogovým převodníkům (DAC) s proudovými výstupy. Transimpedanční zesilovače jsou někdy nesprávně popisovány jako "proudové zesilovače". Obrázek číslo 11 ukazuje vysokoziskový napět'ový zesilovač transformovaný na transimpedanční zesilovač přidáním zpětnovazebního rezistoru R1. Transimpedanční zisk je jednoduše hodnota R1, ačkoli je obvykle vyjádřen ve V/mA spíše než v ohmech [5].



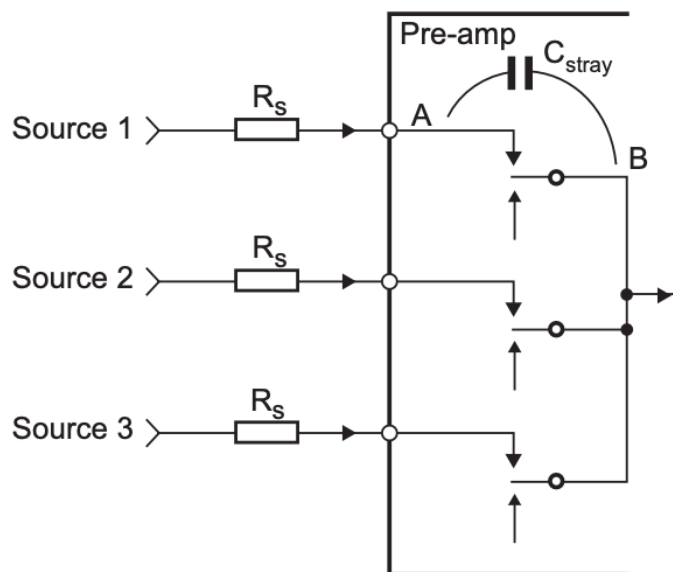
Obr. 11: Transimpedanční zesilovač [5]

1.4 Možnosti přepínání audio signálů

Při více než N:1 cest a dalších požadavcích je důležité přemýšlet nad tím, jakým, způsobem audio cesty přepínat. Audio signál lze přepínat několika způsoby popsanými níže (nejedná se o vyčerpávající přehled):

1.4.1 Mechanické přepínače

Mechanický spínač obvykle při sepnutí vytváří pevné a spolehlivé spojení s odporem jen ve zlomcích ohmu, což je pro malé audio signály dostatečné. Problém však nastává při vypnutí spínače. I když izolační odpor může být v peta-ohmech, kapacita mezi kontakty, která je v pikofaradech, ovlivňuje výkon při vysokých audio frekvencích. Tento efekt závisí na impedanci na přijímací straně spínače. Použití tlačítkového spínače typu ALPS SPUN ukázalo, že na frekvenci 10 kHz je útlum jen 66 dB a uzemnění nevyužité strany zlepší útlum pouze o 2 dB. oktávu. Kapacita spínače je klíčovým faktorem při návrhu směšovacích systémů. Obecně platí, že uzemnění nevyužitých částí spínače nepomáhá výrazně. Kapacitu mezi kontakty lze snadno určit změřením útlumu, tedy ztrátu RC obvodu, a vzhledem k tomu, že odpor je znám, kapacitu lze snadno vypočítat. Jakmile je kapacita známá pro danou konstrukci spínače, lze snadno spočítat útlum pro různé zátěžové odpory. Kapacita mezi kontakty spínačů je relativně konstantní, i když se liší velikostí a konstrukcí. To je dáno tím, že menší spínače mají menší kontakty s menší plochou, ale jsou blíže k sobě [5].

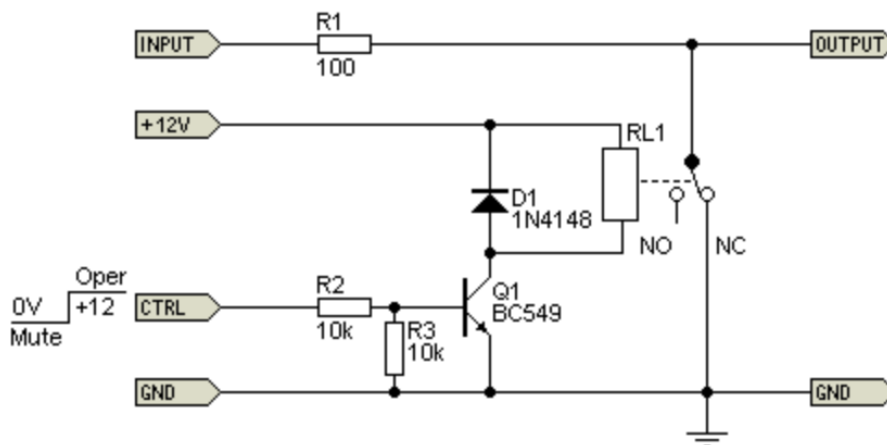


Obr. 12: Znáornění problému kapacity spínačů [5]

1.4.2 Přepínání pomocí relé

Každá elektronická spínací technika musí být porovnáována s relé, které jsou stále hojně používány. Relé poskytují úplnou galvanickou izolaci mezi ovládáním a signálem, nulové zkreslení kontaktů a mají prakticky neomezenou schopnost přenosu signálu v audio aplikacích. Vnější zanedbatelný sériový odpor a jejich únik proudu do země je obvykle také zanedbatelný. Vypínací schopnost může být velmi dobrá, ale závisí na inteligentním použití, protože mezi otevřenými kontakty vždy existuje kapacita, která může způsobit přeslech signálu do vypnutého obvodu stejně jako u mechanických vypínačů. Relé mají také své nevýhody. Jsou relativně velká, drahá, a ne vždy tak spolehlivá, jak by se po více než sto letech vývoje očekávalo. Jejich provozní příkon je významný, i když lze jej snížit pomocí obvodů, které přivádějí plné napětí k sepnutí relé a poté nižší napětí k jeho udržení. Některé typy výkonových relé mohou při použití pro přepínání audio signálů způsobit značné zkreslení, protože signál prochází magnetickým rámem z měkkého železa; takové problémy se však pravděpodobně vyskytují pouze ve výstupních obvodech velkých výkonových zesilovačů. Pro přepínání malých signálů lze linearitu kontaktů relé považovat za dokonalou. Přechodový jev při spínání však může způsobovat praskání, které je nežádoucí. Tato metoda je velmi spolehlivá a výhodná v tom, že automaticky ztlumí signál, když není napájení. Pro znovu zpřístupnění signálu se zapne tranzistor, který napájí cívku relé a odstraní zkrat. To lze provést po zpoždění při zapnutí napájení nebo stiskem tlačítka (místního nebo dálkového). S trochou dodatečného obvodu lze ztlumení znovu aktivovat v okamžiku, kdy se vypne napájení. Nejčastěji používaným relé bude miniaturní typ DPDT (double-pole,

double-throw), výhodou také je, že jedno relé může ztlumit oba kanály stereofonního předzesilovače. Relé musí být samozřejmě napájeno po celou dobu požadovaného průchodu signálu, a tak není úplně energeticky výhodné. Typické relé pro malé signály může odebírat přibližně 12 mA (za předpokladu cívky s napětím 12 V a odporem cívky 1 k Ω) [5][14].



Obr. 13: Příklad zapojení miniaturního relé pro mutování signálu [14]

1.4.3 Elektronické přepínání (CMOS, JFET, BJT)

Elektronické spínání je obvykle realizováno pomocí CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor).

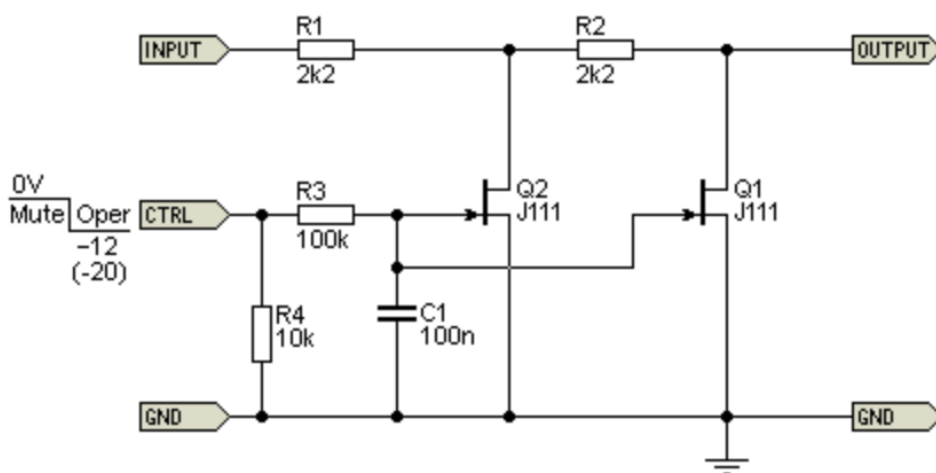
Spínání s CMOS

Analogové brány CMOS, známé také jako přenosové brány, se výrazně liší od logických bran CMOS, i když využívají stejnou technologii. Analogové brány jsou obousměrné, což znamená, že jakýkoliv z jejich vstupních/výstupních pinů může sloužit jako vstup nebo výstup, což neplatí pro logické brány. Slovo „analogové“ v názvu zdůrazňuje, že nejsou omezeny na pevné logické úrovně, ale přenášejí jakýkoliv signál s nízkým zkreslením. Když je brána sepnutá, spojení mezi dvěma piny má odpor, který umožňuje průtok proudů v obou směrech, v závislosti na napětí mezi těmito terminály. Analogové brány jsou známé již dlouho a v mnoha ohledech představují zřejmý způsob elektronického spínání. Mají však také významné nevýhody [5][14].

Diskrétní spínání JFET

Existují alespoň dvě výhody v konkrétních aplikacích s použitím JFET. Za prvé, JFET mohou zvládnout celý výstupní rozsah operačních zesilovačů pracujících z maximálních napájecích napětí, takže mohou přímo přepínat vyšší signálové úrovně bez potřeby zesilovačů pro převod mezi proudovým a napěťovým režimem. Za druhé, přímý přístup k řídicí elektrodě zařízení umožňuje relativně pomalé změny útlumu (stále

v milisekundách), na rozdíl od rychlého zapnutí/vypnutí, které poskytují CMOS brány díky své vnitřní obvodové technologii. To je zásadní pro vytváření tlumících obvodů, které realizují rychlé zeslabení spíše než ostré přerušování, a tím pádem nevytvářejí kliky a rány náhlým přerušením signálu. Nevýhodou je, že JFET vyžadují pečlivě nastavené řídicí napětí, která nemusí být vždy pohodlně získatelná z obvyklých napájecích napětí operačních zesilovačů [5].

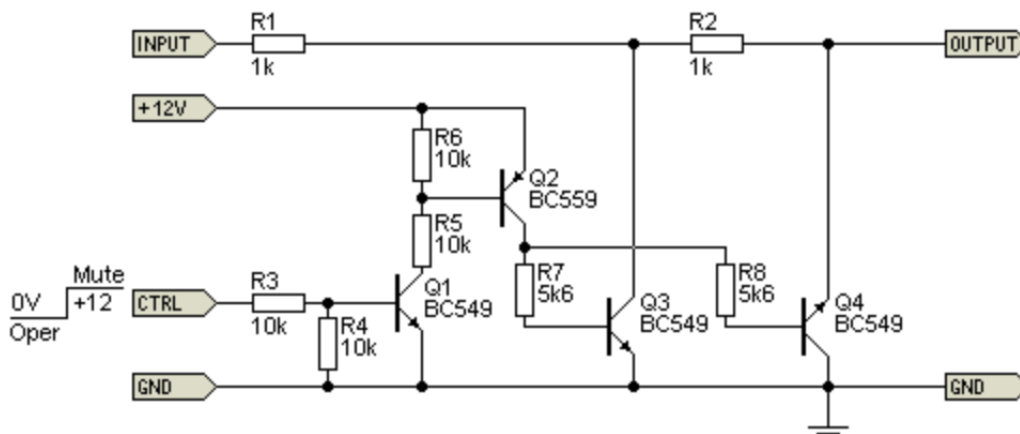


Obr. 14: Příklad zapojení mutování signálu pomocí dvou JFET tranzistorů [14]

Spínání s BJT

Běžné bipolární tranzistory lze také použít pro zapnutí/vypnutí ztlumení. Několik výrobců vyrábělo tranzistory speciálně navržené pro tento účel (například Toshiba 2SC2878 nebo Rohm 2SD2704K, který je stále k dispozici), ale překvapivě dobře fungují i běžné tranzistory. Speciálně navržené tranzistory mají přibližně stejný zisk při obrácení emitoru a kolektoru (tzv. „reverzní zisk“), zatímco běžné tranzistory jsou optimalizovány pro maximální zisk při správném zapojení emitoru a kolektoru. Pokud je zajištěn dostatečný proud báze, běžný tranzistor (například testovaný BC549) funguje dostatečně. Tranzistor zvládne signální úrovně až 5 V RMS a při zapnutí poskytuje vysoký útlum. Jedinou komplikací u BJT je, že báze musí být zcela odpojena, když není přítomen mutovací signál. I vysoký odpor (např. 1 M Ω) způsobí vysoké úrovně asymetrického zkreslení. Alternativně může být báze ztlumovacích tranzistorů při vypnutí připojena na záporné napětí. Záporné napětí (pokud je použito) musí být větší než špičkové signální napětí a musí být menší než zpětné průrazné napětí báze-emitoru (typicky kolem 5 V). Překročení této hodnoty by poškodilo tranzistor. Protože běžné tranzistory mají nízký zisk při obrácení emitoru a kolektoru, proud báze musí být roven špičkovému signálnímu proudu. Například pokud je

napětí zdroje 5 V špička a impedance 1 k Ω , špičkový signální proud je 5 mA, takže je potřeba zajistit alespoň 5 mA proudu báze pro úplné ztlumení [14].



Obr. 15: Příklad zapojení mutování signálu pomocí dvou BJT tranzistorů [14]

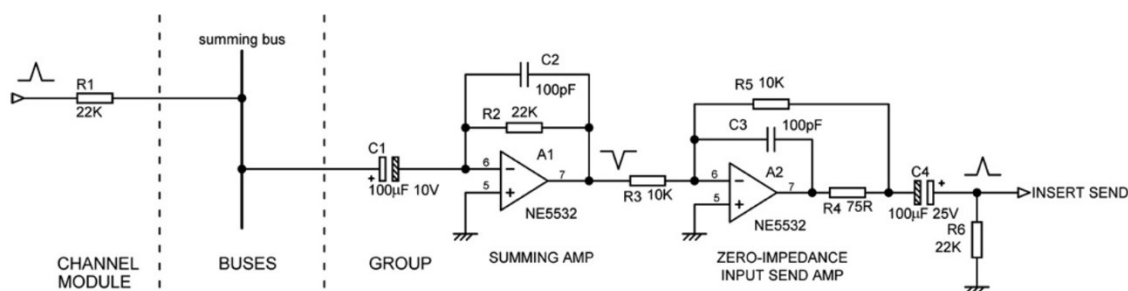
1.4.4 Optoelektrické

Tato metoda využívá k řízení signálu optočleny. Detailnější popis a schéma zapojení je níže v praktické části práce [14]

1.5 Možnosti směšování audio signálů

Pro požadovanou aplikaci přepínání N vstupů na M výstupů lze použít více variant řešení, které jsou závislé na počtu N a M a dalších parametrech například na kvalitu, impedanci, přidaný šum, napěťový rozsah a další. Při větším množství kanálu jak vstupních, tak výstupních je lepší použít princip zjednodušeného mixážního pultu (elektrické směšování), nežli mechanického přepínání, které by exponenciálně bobtnalo. Možnosti elektrického směšování je více a výběr z nich je popsán více v této kapitole. Nejranější mixážní pulty používaly jednoduché napěťové sčítání, známé také jako pasivní sčítání. Hlavní nevýhodou tohoto systému je významné napětí na mixovacích sběrnicích. Signál může být přiváděn na sběrnici z jednoho kanálu a může se vrátit do jiného kanálu. Odtud se může, v závislosti na nastavení ovládacích prvků, dostat na další sběrnici, kde není žádoucí. Tento problém lze zcela odstranit vhodnými bufferovacími stupni, což se také dělalo u velkých konzolí té doby. To však znamená značné množství dodatečné elektroniky, což činí tento systém míchání nevhodným pro nízkonákladové nebo středně nákladové návrhy. Další velkou nevýhodou je, že protože mixovací sběrnice mají na sobě významná napětí, musí být pečlivě a nákladně odstíněny od sebe, aby se zabránilo kapacitnímu přeslechu [5].

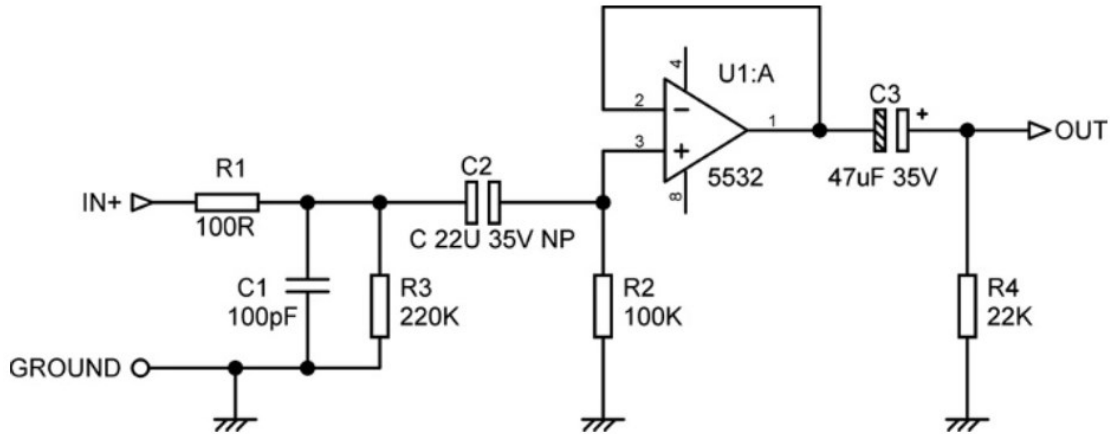
Distribuované směřování je způsob, jak zlepšit šumový výkon směšovacího systému, s ohledem na šum ze samotných směšovacích zesilovačů. V distribuovaném systému jsou signály sumovány ve dvou oddělených stupních. Pokud je například více kanálů, lze je směřovat po blocích, čímž se získají podskupiny, které se poté směšují do jednoho výstupu. Tato vícevrstvá sumační metoda má šumovou výhodu. Pokud každý sumační zesilovač vytváří stejné množství šumu, výsledný šum na výstupu závisí na šumovém zesílení, při kterém pracuje. Nevýhodou je potřeba více hardwaru. V praxi to však není velký problém. Větší starostí může být, že skrytá vrstva směšovačích zesilovačů může způsobit oříznutí signálu bez indikace na ovládacím panelu. Vícevrstvé distribuované sumování je vhodné pro konzole, které jsou stavěny v sekcích, jako jsou moduly po osmi nebo dvanácti. To minimalizuje problémy s magnetickými poli a poklesy napětí. Čím více je potřeba sčítat vstupů, tím lze přidávat sumační mezistupně. V praxi jsou dostatečné 2 stupně pro 32 kanálů po osmi, tzn. 4 sub-mixy [5].



Obr. 16: Příklad jednoduchého sumačního operačního zesilovače [5]

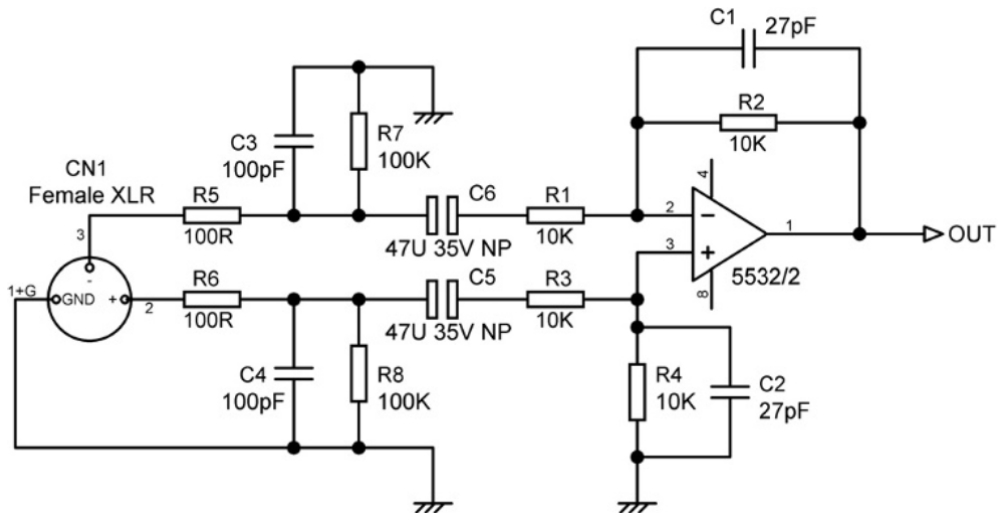
1.6 Vstupní obvody pro linkové audio signály

Vstupní zesilovač začíná RF filtrem pro odstranění šumu a EMC problémů, následovaný DC blokovacím kondenzátorem a diodami pro ochranu před napěťovými špičkami. Vstupní zesilovač musí mít vysokou impedanci, minimálně 10 k Ω , a nastavitelný zisk pro správnou úroveň signálu. U symetrického zapojení vstup převádí diferencíální signály na nesymetrické a redukuje šum. Nesymetrické vstupy jsou často nepraktické kvůli nestabilní impedanci, proto je potřebný buffer zesilovač. RF filtrace je kritická, přičemž komponenty musí být co nejlíže vstupu [5].



Obr. 17: Příklad zapojení nesymetrického předzesilovače [5]

Upravená verze pro symetrické zapojení s dodatečnou EMC ochranou, která lze už použít v praktickém zapojení:



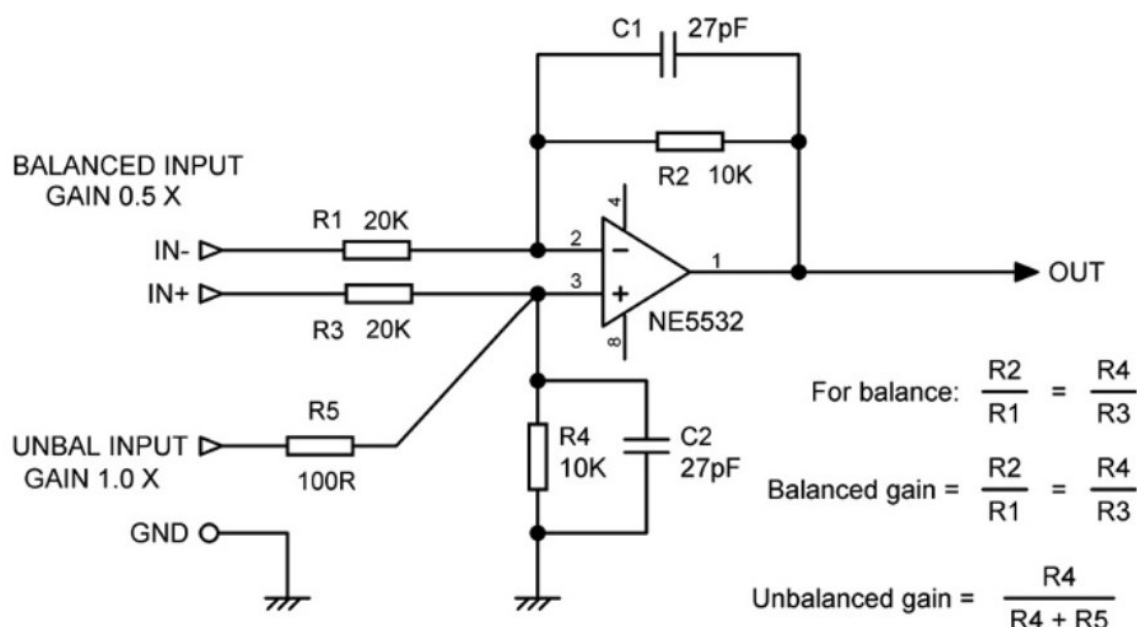
Obr. 18: Základní zapojení symetrického vstupního předzesilovače s EMC ochranou a blokováním DC [5]

Nejdůležitější je, že kondenzátor C1 byl přidán přes zpětnovazební rezistor R2, aby zabránil parazitním kapacitám mezi pinem 2 a zemí, které by způsobily fázové posuny vedoucí k nestabilitě ve vysokých frekvencích. Potřebná hodnota pro stabilitu je malá, mnohem menší než ta, která by způsobila pokles HF kdekoli blízko horní části audio pásma. Hodnoty 10k a 27 pF zde dávají pokles o 3 dB na 589 kHz, což znamená pouze 0,005 dB pokles na 20 kHz. C2, se stejnou hodnotou, musí být přidán přes R4 pro udržení rovnováhy zesilovače a tím i jeho CMRR na vysokých frekvencích. C1 a C2 nesmí být považovány za zajištění EMC imunity, protože C1 není připojen k zemi a je pravděpodobné, že RF signál bude demodulován na vstupech operačního zesilovače. Proto je na každý vstup přidán pasivní RF filtr ve tvaru R5, C3 a R6, C4, aby kondenzátory zkratovaly přicházející RF signál na zem

dříve, než dosáhne operačního zesilovače. Tyto komponenty by měly být co nejbližší vstupnímu konektoru, aby se minimalizovalo vyzařování uvnitř krytu [5].

Kombinace nesymetrického a symetrického vstupu v jednom

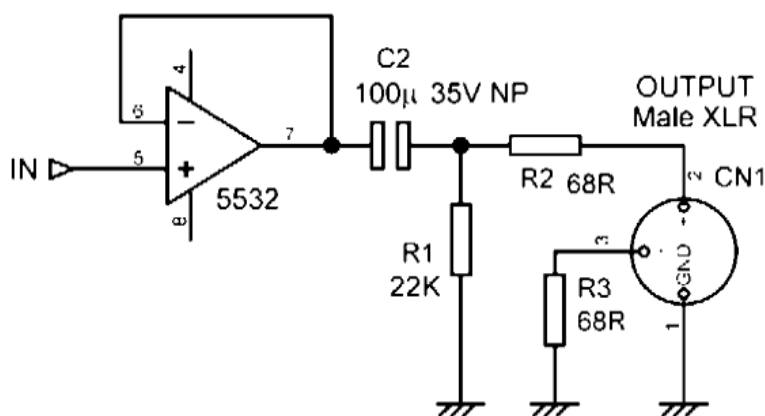
Pokud jsou potřeba jak nesymetrické, tak symetrické vstupy, je velmi praktické zařídit, aby mezi nimi nebylo nutné přepínat. Přepínače zvyšují náklady, vyžadují více otvorů v kovových částech a prodlužují dobu montáže. V režimu symetrického vstupu je zdroj připojen k symetrickému vstupu a nesymetrický vstup zůstává nepřipojen. V režimu nesymetrického vstupu je zdroj připojen k nesymetrickému vstupu a symetrický vstup zůstává nepřipojen, bez nutnosti přepínání. Může se zdát, že nepřipojené vstupy by zachytávaly šum, ale v praxi tomu tak není. Tento přístup funguje velmi dobře. Ve světě hi-fi jsou symetrické signály na dvojnásobné úrovni oproti ekvivalentním nesymetrickým signálům, takže symetrický vstup musí mít zisk 0,5 nebo -6 dB ve srovnání s nesymetrickým vstupem, aby bylo dosaženo stejného zisku oběma cestami. Toho se dosáhne zvýšením hodnot R1 a R3 na 20 kΩ. Symetrický zisk může být větší nebo menší než 1, ale zisk přes nesymetrický vstup je vždy 1. Je důležité, aby byl připojen pouze jeden vstupní kabel najednou, protože pokud je ponechán nepřipojený kabel k nepoužívanému vstupu, kapacita kabelu vůči zemi může způsobit anomálie ve frekvenční odezvě a za nepříznivých okolností může způsobit oscilace ve vysokých frekvencích [5].



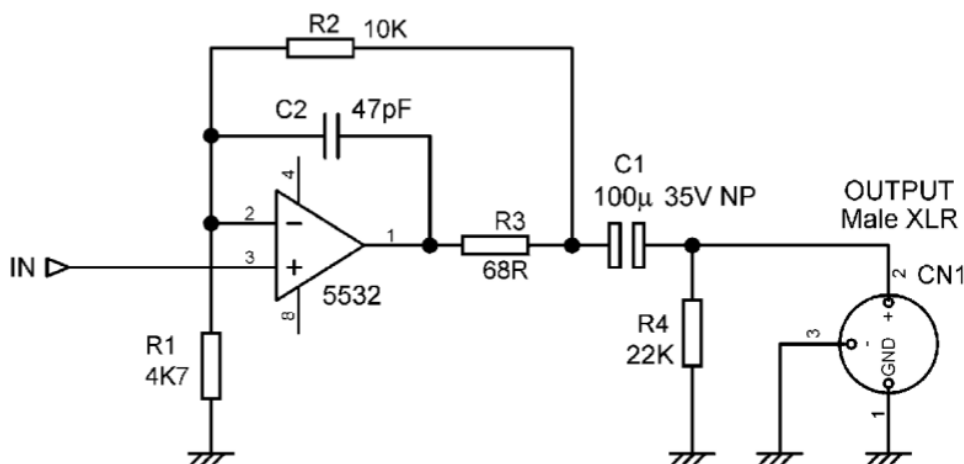
Obr. 19: Schéma zapojení pro kombinaci nesymetrického a symetrického vstupu v jednom [5]

1.7 Výstupní obvody pro linkové audio signály

Oba příklady zapojení nesymetrických výstupu níže mají sériové výstupní rezistory pro zajištění stability při připojení ke kabelové kapacitě. To zvyšuje výstupní impedanci a může vést ke zvýšenému přeslechu v některých situacích. Jedním z takových případů, vyřešeným pomocí výstupu s „nulovou impedancí“, detailněji je popsán v praktické části u signálové sběrnice z důvodu použití pro inzertní výstupy. Existují pouze dva elektrické výstupní terminály pro nesymetrický výstup, signál a zem. Nicméně, nesymetrický výstupní stupeň na obrázku s „nulovou impedancí“ je nakreslen s třípinovým XLR konektorem, aby zdůraznil, že je vždy možné připojit studený vodič ve vyváženém kabelu k zemi na výstupu a stále získat všechny výhody potlačení common-mode signálu, pokud následuje symetrický vstup [5].



Obr. 20: Příklad zapojení impedančně symetrického nesymetrického výstupu [5]



Obr. 21: Příklad zapojení výstupu s "nulovou impedancí" [5]

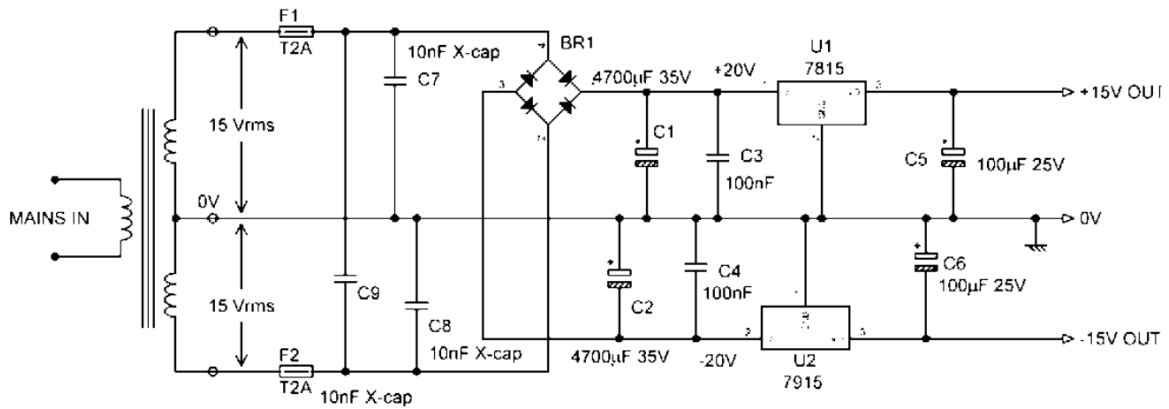
1.8 Zdroj pro audio zařízení

Vytvoření jednoduchého napájecího zdroje pro systém založený na operačních zesilovačích je velmi snadné od doby, kdy byly představeny regulátory LM7815/7915. Tyto součástky jsou robustní a levné, mají ochranu proti přetížení i přehřátí a poskytují dostatečně nízký výstupní šum pro většinu aplikací. Základní obvodové schéma, ze kterého použitý zdroj vychází s typickými hodnotami součástek; transformátorem s vyvedeným středem, můstkovým usměřňovačem a dvěma kondenzátory C1 a C2. Tyto kondenzátory poskytují neregulované napájecí napětí pro IC regulátory. Sekundární pojistky musí být pomalé. Malé kondenzátory C7–C9 na vstupu usměřňovače snižují RF emise z usměřňovacích diod; jsou uvedeny jako X-kapacitní typy, ne proto, že by musely odolávat 230 V_{rms}, ale aby bylo zdůrazněno, že musí být schopné odolávat trvalému AC napětí. Kondenzátory C3 a C4 zajišťují vysokofrekvenční stabilitu regulátorů. C5 a C6 nejsou potřebné pro stabilitu regulátorů řady 78/79 – slouží pouze ke snížení výstupní impedance napájecího zdroje při vysokých audio frekvencích. Existují pouze dvě zásadní elektrická konstrukční rozhodnutí: AC napětí sekundárního vinutí transformátoru a velikost kondenzátorů C1 a C2. Co se týče prvního, musíte zajistit, aby neregulované napájení bylo dostatečně vysoké, aby zabránilo poklesu napětí (tj. průchodu brumu) při nízkém síťovém napětí, ale ne tak vysoké, aby byl překročen maximální vstupní napětí regulátoru nebo aby regulátor nepřehříval. Jak nízké síťové napětí je vhodné brát v úvahu, závisí do jisté míry na tom, kde si myslíte, že bude vaše zařízení použito, protože některé části světa jsou více náchylné k poklesům napětí než jiné. Je potřeba zohlednit jak minimální napěťový pokles přes regulátory (obvykle cca 2 V), tak amplitudu zvlnění na kondenzátorech C1 a C2, protože právě ve spodních částech zvlnění regulátor první „vypadne“ a propustí nežádoucí rušení. Obecně platí, že efektivní hodnota sekundárního vinutí transformátoru bude přibližně rovna stejnosměrnému výstupnímu napětí. Velikost kondenzátorů C1 a C2 závisí na množství proudu, který bude ze zdroje odebírán. Amplituda zvlnění od špičky ke špičce je obvykle v rozmezí 1–2 voltů; větší zvlnění než toto, snižuje účinnost, protože neregulované napětí musí být zvýšeno, aby se kompenzovaly příliš nízké spodní části zvlnění, a menší zvlnění je obvykle zbytečné a zvyšuje velikost a cenu kondenzátorů. Zároveň provozování operačních zesilovačů na mírně vyšším napětí ±18 V místo například ±15 V zvyšuje headroom a dynamický rozsah o 1,1 dB prakticky bez nákladů a bez snížení spolehlivosti [5].

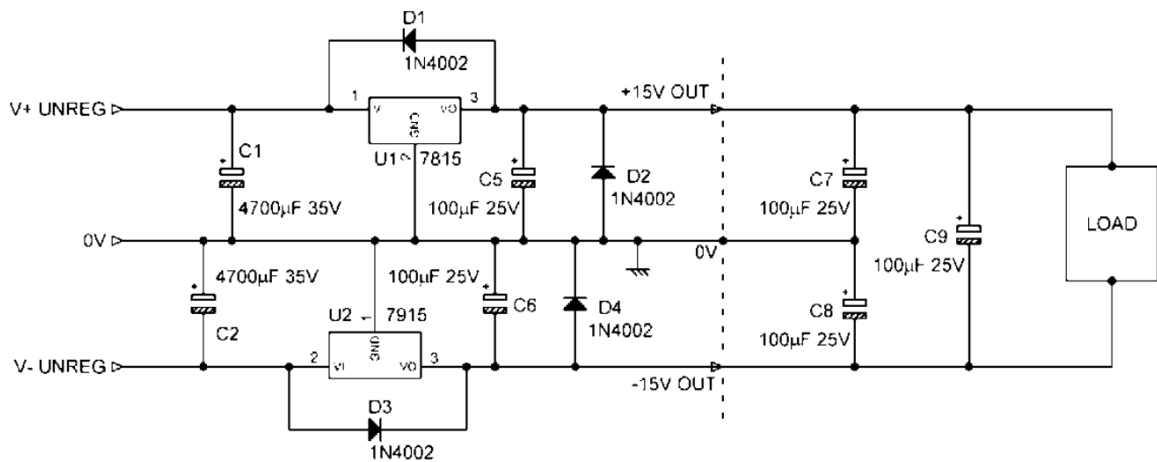
Množství zvlnění lze s dostatečnou přesností odhadnout pomocí následujícího vzorce:

$$U_{pk-pk} = \frac{I \cdot \Delta t \cdot 1000}{C} [V] \quad (12)$$

Kde U_{pk-pk} je amplituda zvlnění od špičky ke špičce na kondenzátoru, I je maximální proud odebíraný z napájecí větve v ampérech, Δt je doba vybíjení kondenzátoru, která se bere jako 7 milisekund, C je kapacita kondenzátoru v mikrofaradech a faktor „1000“ slouží k umístění desetinné čárky na správné místo. Doba vybíjení je přibližná hodnota a předpokládá, že kondenzátor je nabíjen přes můstek po dobu 3 ms a poté vybíjen zátěží po dobu 7 ms. Tento přibližný odhad se dle Selfa Douglese vždy osvědčil. Regulátory musí být vybaveny adekvátním chlazením. Maximální napěťový pokles na každém regulátoru (při předpokladu 10 % vysokého síťového napětí) se vynásobí maximálním výstupním proudem, aby se získal výkonový ztrátový výkon v regulátoru ve wattech. Poté se vybere chladič s vhodným tepelným odporem k okolí (ve °C na watt), aby teplota pouzdra regulátoru nepřesáhla například 90 °C. Je nutné zahrnout teplotní pokles přes tepelnou podložku mezi regulátorem a chladičem. V některých případech je dobré přidat ochranné diody do obvodu regulátoru, jak je ukázáno na obrázku číslo 23. Dioda D1 a D3 jsou za normálního provozu reverzně polarizovány, ale pokud napájecí zdroj napájí zátěž s velkou kapacitou, může se stát, že výstup zůstane na vyšším napětí, než vstup regulátoru, jak se napětí na kondenzátoru snižuje. D1 a D3 tomuto efektu zabraňují tím, že brání aplikaci reverzního napětí na regulátory. Tyto diody nejsou obvykle potřeba u běžných obvodů s operačními zesilovači, protože množství odrušovacích kondenzátorů, jak je ukázáno na obrázku 23 jako C7 a C8, je obvykle skromné. Ochranné diody D2 a D4 jsou opět za normálního provozu reverzně polarizovány. D2 zabraňuje tomu, aby napájecí větev +15 V klesla pod 0 V, pokud se větev -15 V zapne o něco rychleji, a podobně D4 chrání regulátor -15 V před zvýšením výstupu nad 0 V. To může být důležitým problémem, pokud se používá odrušení mezi větvemi, například C9 [5].



Obr. 22: Příklad jednoduchého napájecího symetrického zdroje [5]



Obr. 23: Možné schéma zapojení symetrického zdroje s ochrannými diodami a decoupling kondenzátory (C7, C8) [5]

2 Praktická část

Tato část práce se zabývá samotným návrhem audio přepínače do akustické laboratoře. Cílem je moci přepínat libovolné vstupy na libovolné výstupy. Byl zvolen modulární systém, kdy je celé zařízení rozděleno na jednotlivé funkční části. Konkrétně se audio přepínač skládá z 6 částí. Jedná se o vstupní obvody, výstupní obvody, signálovou sběrnici, napájecí sběrnici, blok pro ovládací panel a blok osazený konektory. Celé zařízení tak do budoucna bude možné dále vylepšovat nebo v případě poruchy lépe opravit. Navíc na signálové sběrnici a zdrojové sběrnici jsou volné přípojné body, pro případné budoucí rozšíření o další výstupy. Všechny schémata a návrhy PCB včetně 3D vizualizace jsou vytvořeny v programu KiCad ve verzi 8.0.1.

2.1 Definice požadavků

Jelikož je zařízení navrhováno pro konkrétní účel, a to do akustické laboratoře FEL na ZČU, byly zadány specifické požadavky na rozhraní (počet vstupů a výstupů) včetně dalších parametrů.

2.1.1 Vstupy

Vstupní obvody jsou vždy symetrické a stereo s linkovou napěťovou úrovní používanou v profesionální audiotechnice +4 dBu. Požadavky na počet vstupů jsou následující:

- 4x počítač se zvukovou kartou s linkovým výstupem XLR,
- 1x studiový digitální mixážní pult s počítačem s linkovým výstupem XLR,
- 3x rezervní vstupy XLR
- 2x linkový Jack 3,5 mm pro připojení externích přehrávačů, např. mobil nebo tablet.

2.1.2 Výstupy

Požadavky na výstupní obvody jsou obdobné jako na obvody vstupní. Též jde vždy o stereo signál se symetrickým výstupem v případě XLR a s nesymetrickým pro Jack konektory. Počet výstupů je následující:

- 3x XLR pro studiové monitory
- 2x stereo Jack 3,5 mm / 6,35 mm

2.1.3 Regulace hlasitosti a další požadavky

Požadavky na ovládání jsou takové, že vstupní obvody mají pevně nastavený zisk na 0 dB a pracují na linkové úrovni +4 dBu. Pro kontrolu správně nastavené úrovně vstupního signálu je ihned za symetrickým linkovým přijímačem (Balanced Input Line Receiver) dostupná LED indikace úrovně signálu ve třech stupních. Stupeň jedna indikuje přítomnost signálu na každém kanálu zvlášť nastavený na -30 dBu. Druhý stupeň je defaultně nastaven na ideální vnitřní pracovní napětíovou hladinu +4 dBu a indikuje optimálně silný signál. Poslední třetí stupeň indikuje přebuzení a bude nastaven těsně pod hranici maximálního vstupního napětí. Každá LED dioda v celém zařízení má k dispozici trimr pro jemné nastavení prahu rozsvícení. Regulace hlasitosti je celková a pak lze poměrově zeslabit každý výstup. K dispozici je také možnost ze stereo signálu udělat mono signál a připojit do signálového řetězce pomocí dvou inzertních bodů externí zpracování signálu, jako je ekvalizace, komprese nebo další možnosti.

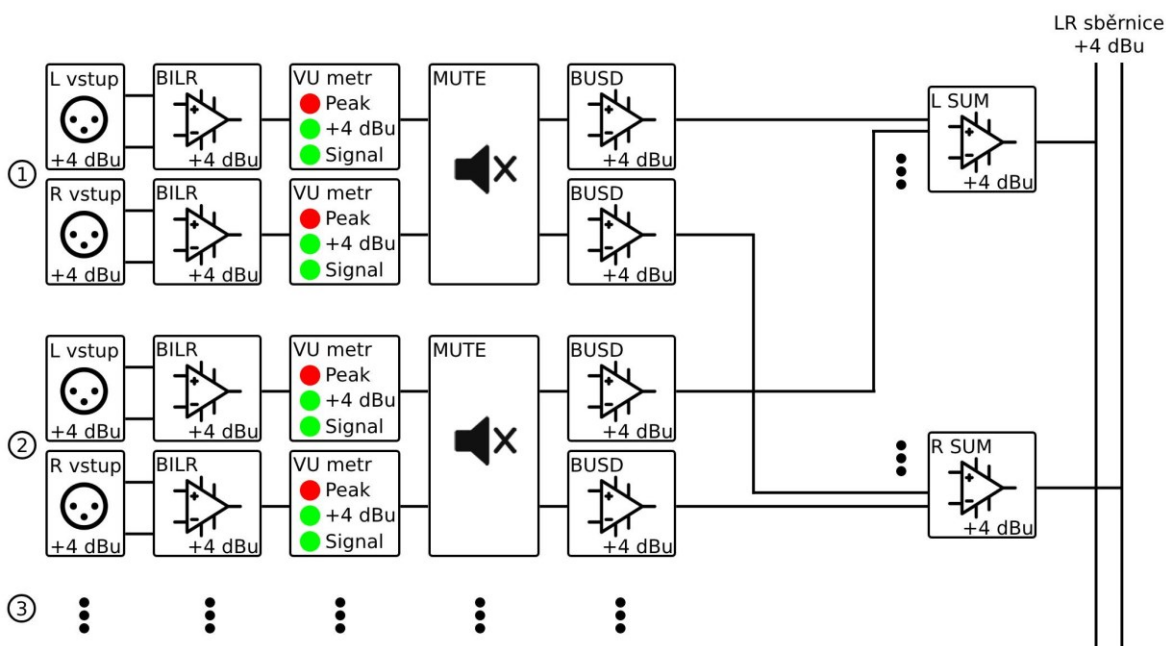
2.2 Návrh zapojení

Celé zařízení je rozděleno na několik samostatných dílčích celků, které budou podrobněji rozebrány. Napájecí napětí všech operačních zesilovačů a integrovaných obvodů je symetrické +18 a -18 V. Pro nezávislost jednotlivých bloků a co nejmenší vzájemné ovlivňování má každý blok vlastní stabilizátor napětí, který je napájen ze zdrojové sběrnice. LED metry pak mají také samostatnou regulaci a stabilizaci na 12 V. Celá vnitřní struktura pracuje na linkové úrovni +4 dBu. Jednotlivé bloky, jejich kompozici a napětíovou úroveň vyobrazuje následující část práce.

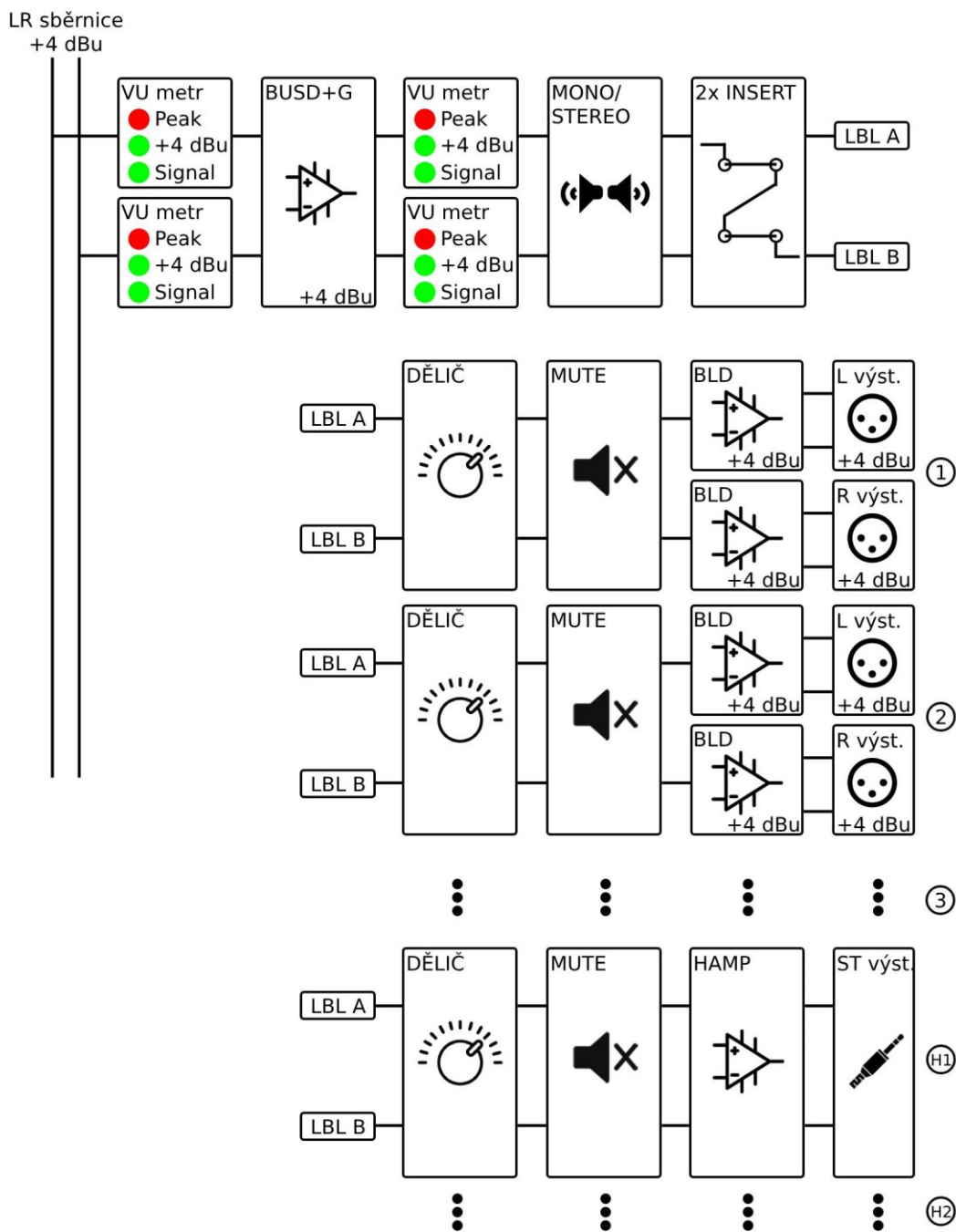
2.2.1 Úrovňový diagram

Signálový řetězec je rozdělen na 3 hlavní části. Vstupní obvody, sběrnice a výstupní obvody. Signál prochází cestou, kterou vyobrazuje následující blokový úrovňový diagram: Připojení stereo signálu symetricky pomocí XLR → vstupní symetrický linkový přijímač (Balanced Input Line Receiver = BILR) → převedení na nesymetrický stereo signál → VU metr → obvody pro vypnutí signálu vstupu → linkový budič sběrnice (BUSD) → VU metr → suma všech signálů pro levý a pravý kanál zvlášť s nastaveným ziskem sumačního zesilovače → VU metr → přepínání MONO / STEREO → 2x inzertní bod → napětíový dělič pro plynulé poměrové zeslabení signálu → obvody pro vypnutí signálu výstupu → linkový symetrický budič (Balanced Line Driver = BLD) → výstupní symetrický stereo signál.

Následující blokové schéma také znázorňuje modulární uspořádání jednotlivých částí. Díky modulárnímu uspořádání bude v budoucnu možné například v případě potřeby mikrofonního vstupu navrhnout jen blok mikrofonního předzesilovače s výstupní linkovou úrovní a připojit jej místo instalovaného linkového vstupu. Bloky jsou L SUM a R SUM jsou naznačení místa sečtení signálů a nejedná se o konkrétní obvod, součtový zesilovač je až BUSD+G s nastavitelným zesílením.



Obr. 24: Úrovňový diagram první část



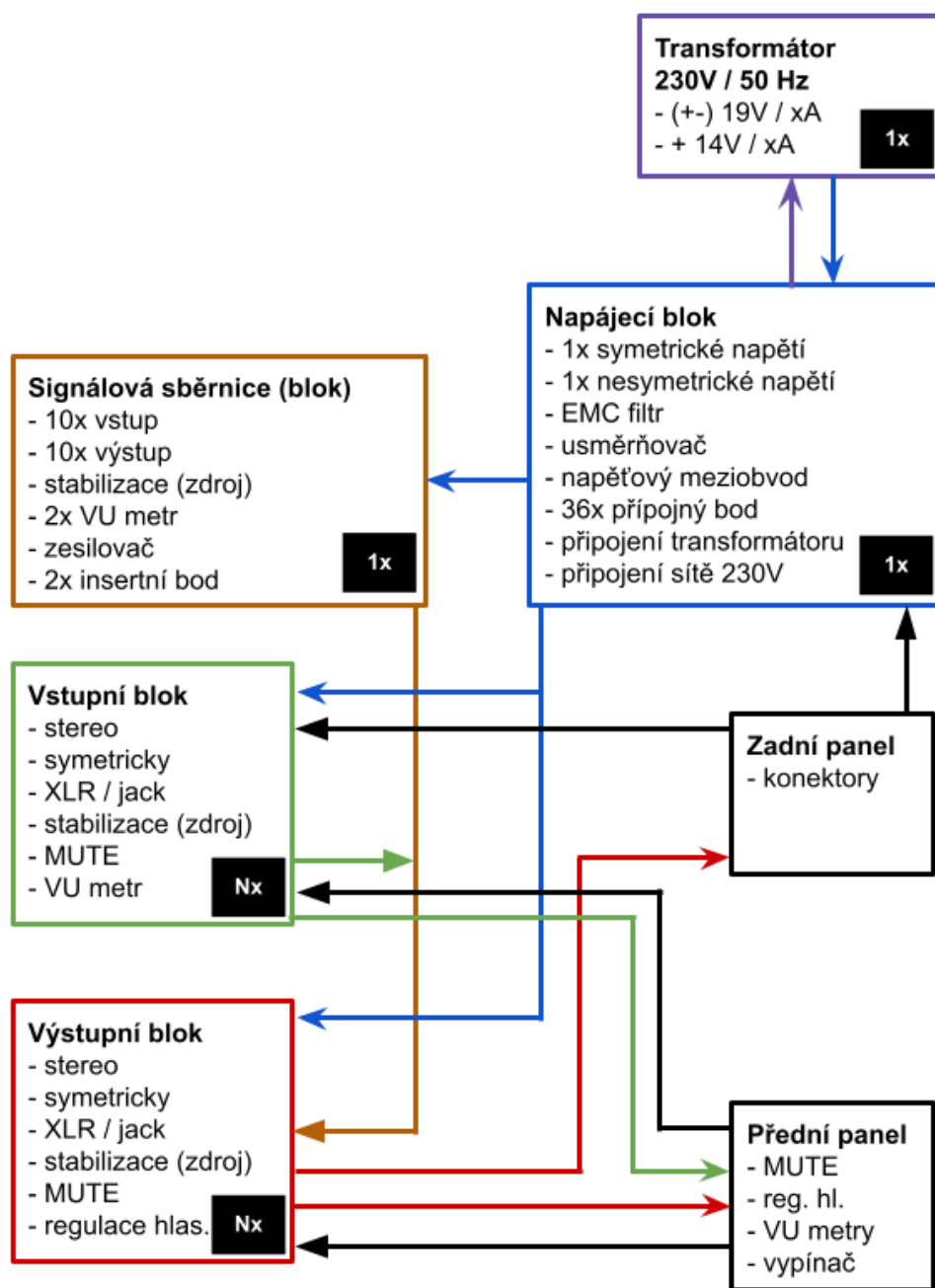
Obr. 25: Úrovnňový diagram druhá část

2.2.2 Fyzické propojení

Následující blokové schéma znázorňuje fyzické propojení a vazby jednotlivých modulů (PCB). U každého modulu je také počet, kdy Nx znamená možné proměnlivé množství těchto bloků. Jednotlivé desky budou následující:

- Jednotlivé PCB vstupních obvodů, jedna deska = symetrický linkový stereo vstup,
- PCB výstupních obvodů, jedna deska = symetrický linkový stereo výstup,
- PCB se signálovou sběrnicí a sumací signálu, jen jedna centrální PCB,

- Deska napájecího bloku s usměrňovačem a napěťovým meziobvodem s třemi napěťovými hladinami včetně EMC filtru,
- Transformátor + pojistka ve vstupním konektoru,
- PCB pro blok konektorů ze zadní strany zařízení, s konektory pro připojení k centrální signálové a zdrojové sběrnici,
- Přední panel osazený LED VU metry, potenciometry a MUTE tlačítky, navíc na předním panelu jsou paralelně se zadní stranou vyvedeny inzertní vstupy, vstupy s Jack konektory 9 a 10 a výstupy s Jack konektory 5 a 6.

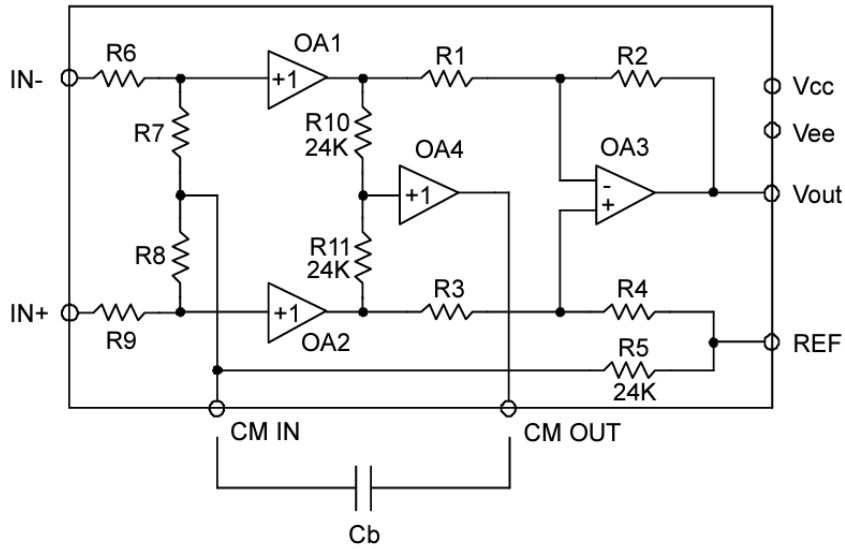


Obr. 26: Fyzické propojení bloků

2.2.3 Obvod vstupních bloků

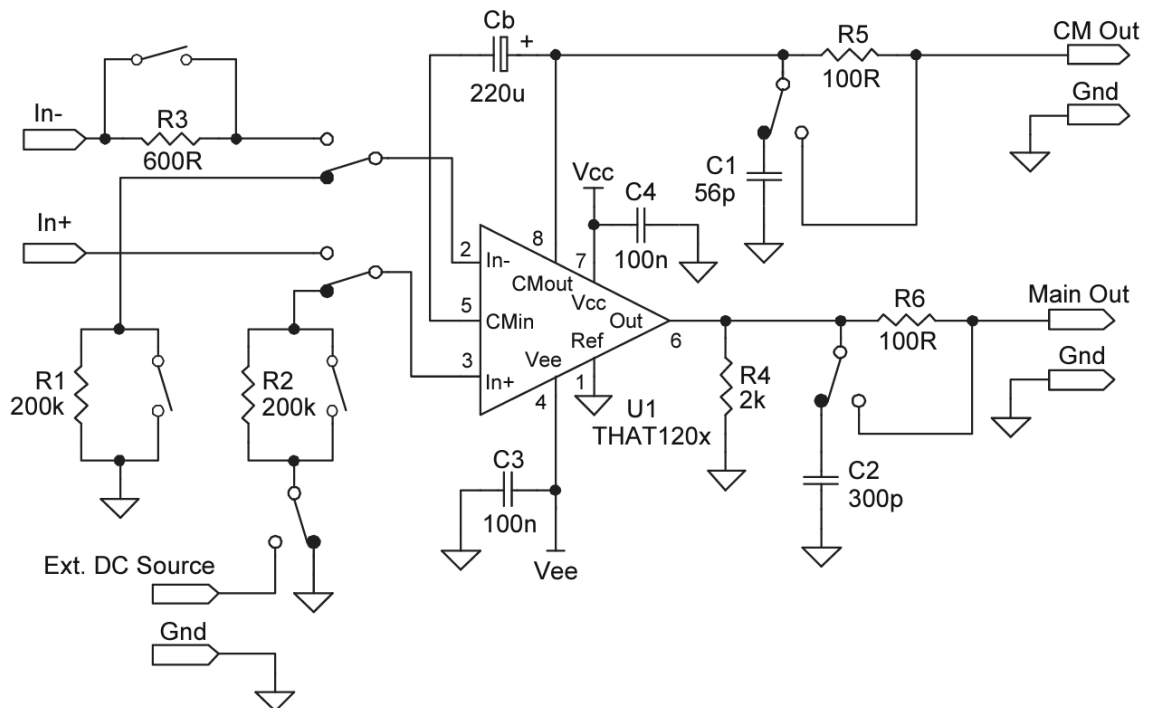
Pro blok vstupních obvodů bylo použito integrovaného obvodu od firmy THAT Corporation z důvodu vysoké kvality obvodu a nemožnosti dosáhnout podobných parametrů v běžném prostředí s běžnými součástkami, zejména kvůli tolerancím součástek. Obvod má celý název InGenius High-CMRR Balanced input Line Receiver ICs řada THAT 12XX. Výrobce o tomto integrovaném obvodu uvádí, že linkové přijímače THAT 1200 překonávají vážné omezení běžných symetrických vstupních stupňů jako je špatné potlačení stejnosměrné složky v reálných aplikacích. Zatímco běžné vstupní stupně vykazují dobré výsledky v laboratorních podmínkách, v praxi nedosahují specifikací CMRR, když jsou napájeny i jen mírně nevyváženými zdrojovými impedancemi, a to je běžná situace v jakémkoli profesionálním zvukovém prostředí. To je způsobeno nízkou vstupní impedancí common – mode režimu u běžných stupňů, která interaguje s nevyváženostmi zdrojových impedancí a mění signály od požadovaných symetrických signálů. Patenty chráněné vstupní stupně InGenius, vyvinuté Billem Whitlockem ze společnosti Jensen Transformers, využívají chytré bootstrappingové řešení ke zvýšení vstupní impedance v režimu common – mode do rozsahu megaohmů, aniž by se zvyšoval šum, který by vyvolalo použití rezistorů s vysokou hodnotou. Stejně jako transformátory, InGenius linkové přijímače udržují vysoké CMRR v širokém rozsahu nevyvážených zdrojových impedancí dokonce i při napájení z nesymetrických zdrojů. Na rozdíl od transformátorů však tyto širokopásmové polovodičové zařízení nabízejí stejnosměrné propojení, nízké zkreslení a transparentní zvuk v malém balení za rozumnou cenu. Obvod je možné použít primárně jako linkový symetrický audio přijímač, nástrojový zesilovač, diferenční zesilovač. Parametry obvodu udávané výrobcem jsou následující:

- Vysoké CMRR: 90 dB při 60 Hz
- Extrémně vysoká common-mode vstupní impedance
- Frekvenční rozsah: >22 MHz
- Nízké zkreslení: 0,0005 % THD
- Nízký šum: -106 dBu
- Napájecí napětí: *min.* $\pm 3V$ a *max.* $\pm 18V$
- Možnost pracovat do zkratu
- Maximální vstupní napětí: $\pm 25V$ (THAT1200), $\pm 31V$ (THAT1203 a 1206)
- Maximální odebíraný proud: 8 mA (bez signálu)
- Maximální zkratový proud: $\pm 25 mA$ [15].



Part no.	R6, R9	R7, R8	R1, R3	R2, R4
THAT1200	0	24 k Ω	6 k Ω	6 k Ω
THAT1203	7 k Ω	17 k Ω	6 k Ω	6 k Ω
THAT1206	7 k Ω	17 k Ω	7 k Ω	5 k Ω

Obr. 27: Ekvivalentní blokové zapojení ve 3 verzích rozsahu vstupního signálu pro zisk 0 dB (THAT1200), zisk -3 dB (THAT1203) a zisk -6 dB (THAT1206) [15]

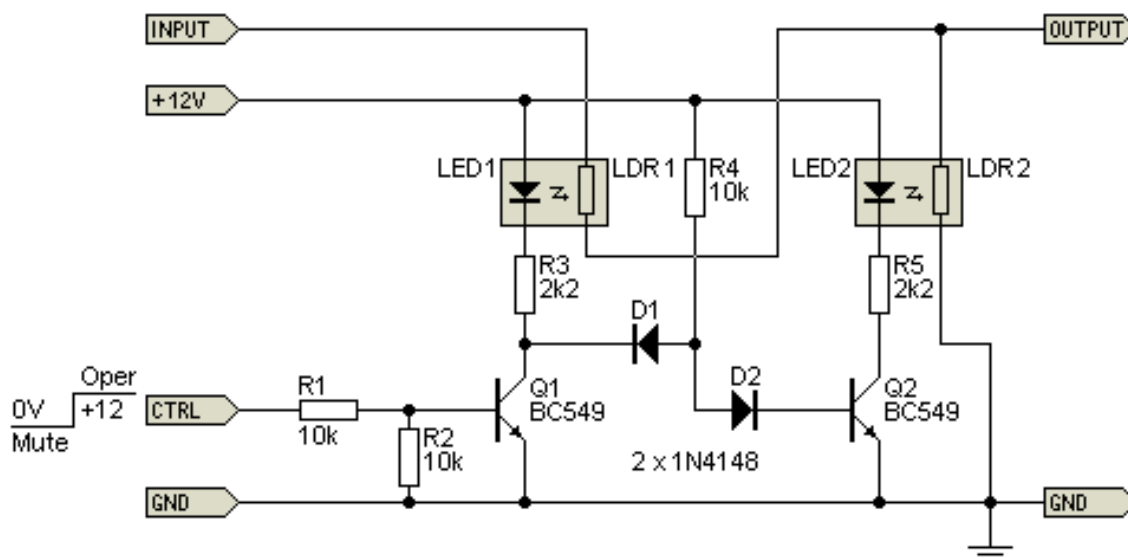


Obr. 28: Schéma zapojení pro testování obvodu a ověření parametrů [15]

Pro vypínání (MUTOVÁNÍ) signálu byl z několika možností vybrán obvod od Roda Elliotta, který splňuje požadavky na vypínání signálu bez praskání a zároveň minimálně ovlivňuje procházející signál již z principu zapojení. Obvod využívá pro řízení signálu dva optočleny.

Ideálně je potřeba pro každý kanál dva optočleny LED/LDR, protože jejich odpor v sepnutém stavu je poměrně vysoký. Jeden z nich slouží k vypnutí signálu, zatímco druhý zkratuje případný zbytkový signál na zem. Jsou snadno ovladatelné a vykazují velmi nízké zkreslení, obvod je ale složitější a dražší než například obvody s JFET nebo BJT. Tento parametr je však u studiového vybavení požadující co nejlepší výsledek irelevantní. Je možné dosáhnout útlumu alespoň 100 dB a LDR mají poměrně pomalou odezvu s nízkým zkreslením během přechodu. To z obvodu dělá systém „měkkého“ ztlumení, kde je signál během několika stovek milisekund postupně snížen na nulu a podobně se vrací zpět. Lze použít standardní komerční jednotky LED/LDR.

Když je vstup CTRL v HIGH, tranzistor Q1 se otevře a proud procházející přes rezistor R3, rozsvítí LED1. Tranzistor Q1 také odebere proud do báze tranzistoru Q2 přes diodu D1. Dioda D2 je zde, aby zajistila, že Q1 může odebrat veškerý proud báze, takže Q2 zůstává vypnutý. LED2 je zhasnutá, LDR2 má vysoký odpor a LDR1 má nízký odpor. Signál tak prochází na výstup. Když je vstup 'CTRL' na LOW (0V), Q1 už nemůže odsávat proud báze pro Q2 (dodávaný přes R4), takže Q2 se otevře a LED2 se rozsvítí, čímž se signál odvádí na zem, a protože LED1 je zhasnutá, zbývající (malý) signál je plně utlumen LDR2. Dioda je nezbytná, bez ní by obvod nefungoval. Bez napájení dochází k určitému ztlumení, protože obě LED jsou zhasnuté a LDR mají vysoký odpor. Celkový útlum závisí na odporu LDR1 při zhasnutí LED1 a vstupní impedanci následujícího stupně [14].

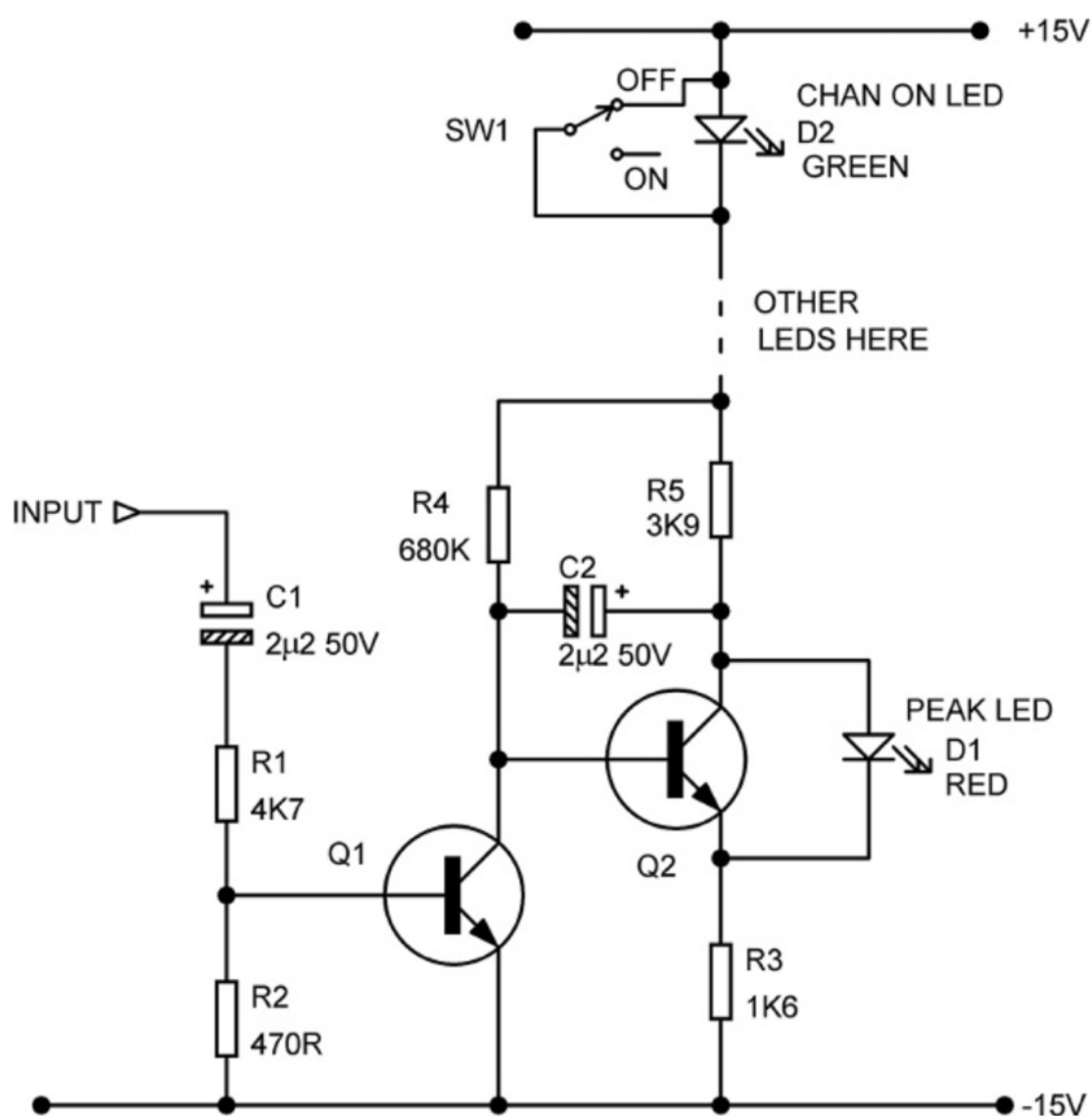


Obr. 29: Použitý obvod pro mutování signálu [14]

Aby nebyl zatěžovaný linkový přijímač a na jeho výstupu byl dostatečný odpor, je zde pro buzení obvodu pro MUTOVÁNÍ operační zesilovač v režimu napětěového sledovače, který

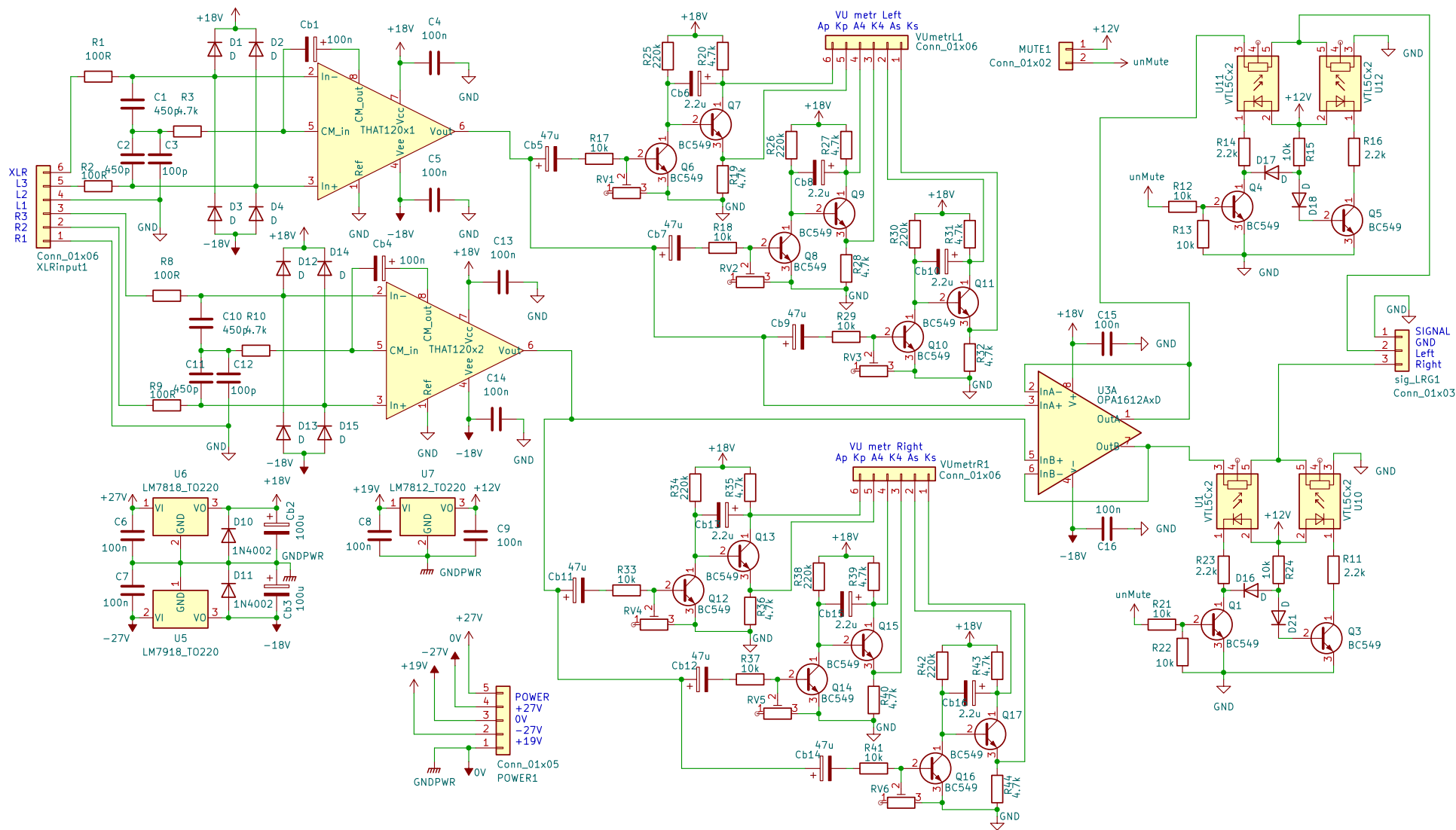
je též integrovaný obvod s dvěma operačními zesilovači v jednom pouzdře pro co nejhomogeničtější vlastnosti pro oba kanály.

Poslední funkční část (vyjma stabilizátorů napětí) je obvod pro indikaci sledovaného napětí (VU metr, Peak indikátor). Obvod vychází od Selfa Douglase z knihy „Small Signal Audio Design“ a je také široce známý a běžný i na internetu. Použité schéma vychází z následujícího obvodu a je upravené na vyšší napájecí napětí a doplněno o možnost nastavit napět'ovým děličem rozsvícení indikační LED diody [5]



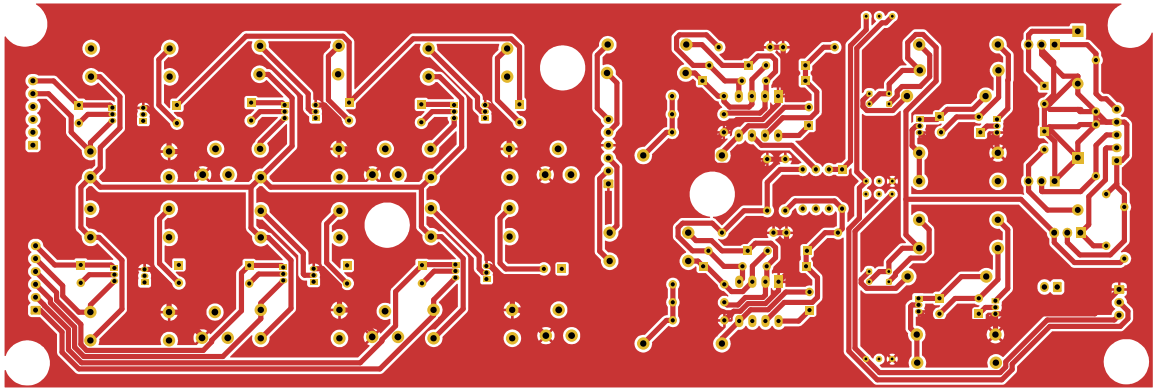
Obr. 30: Jednoduchý unipolární LED detektor dosaženého napětí [5]

V následující části je již celé schéma vstupního obvodu včetně všech součástí na obrázku číslo 31.

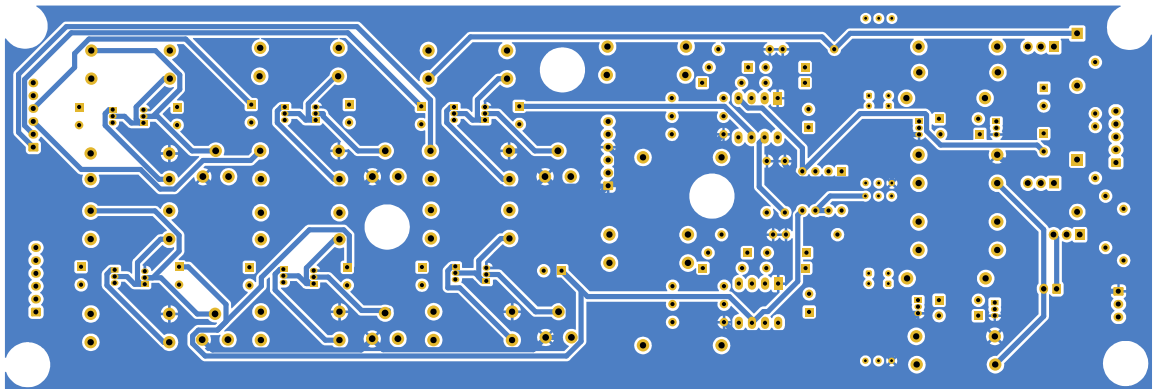


Obr. 31: Schéma zapojení vstupního bloku

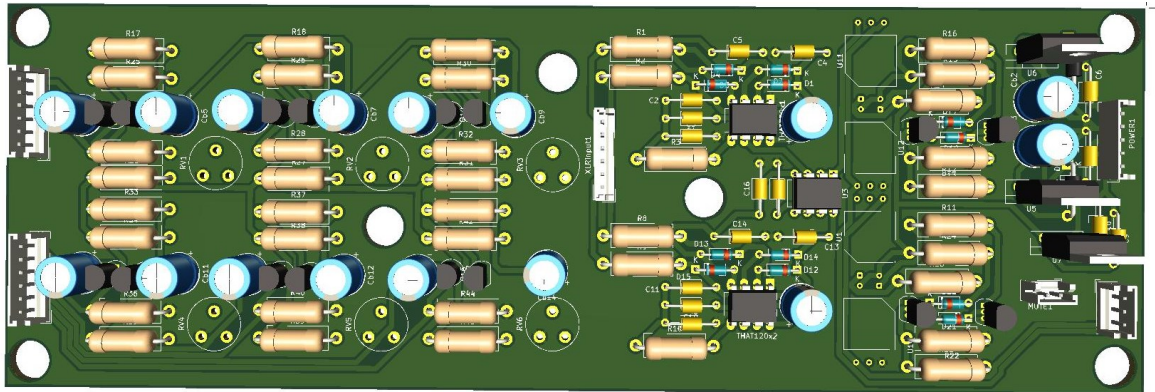
Vytvořené PCB jsou s oboustranným návrhem.



Obr. 32: PCB vstupního bloku – horní strana



Obr. 33: PCB vstupního bloku – spodní strana



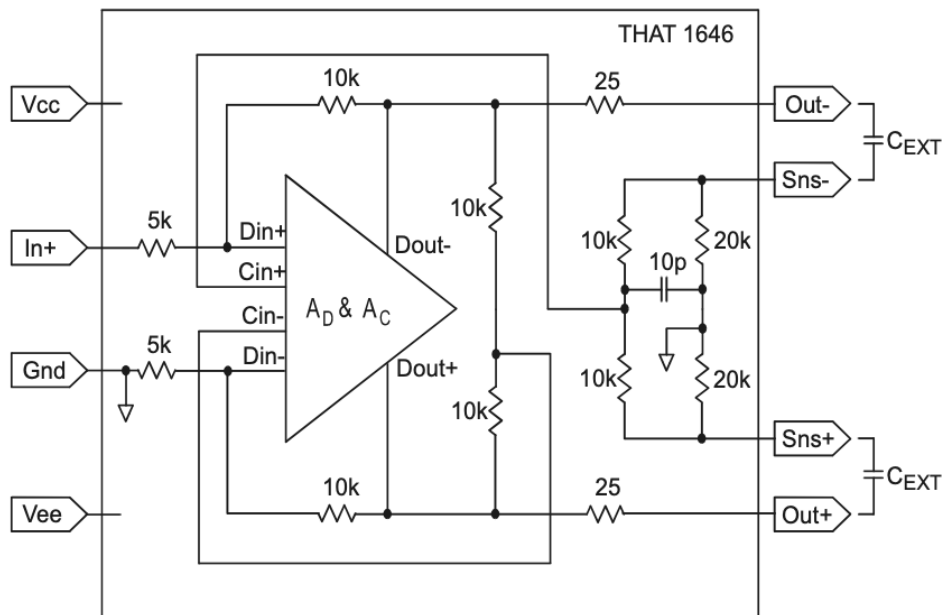
Obr. 34: 3D model PCB vstupního bloku

2.2.4 Obvod výstupních bloků

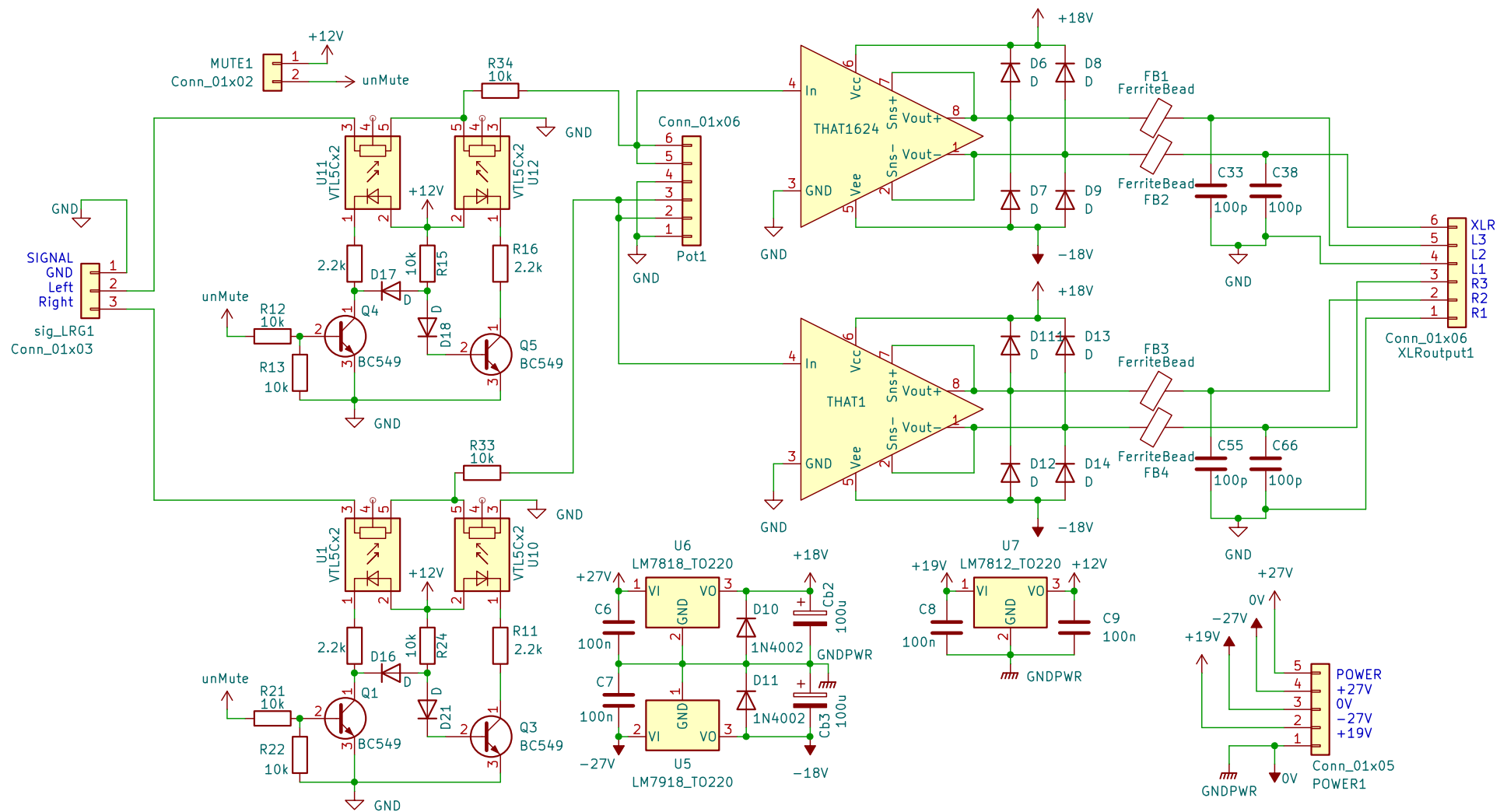
Obvod výstupního bloku používá stejné obvody pro MUTOVÁNÍ signálu, jako vstupní obvody. Pro samotný výstup je použit integrovaný obvod také od firmy THAT Corporation. Tentokrát jde o obvod utSmart Balanced Line Driver ICs řada THAT 16XX. Výrobce o tomto obvodu uvádí, že modely THAT 1606 a 1646 představují novou generaci monolitických audio diferenciálních lineárních budičů, které nabízejí zlepšený výkon oproti konvenčním návrhům. Na základě vysokovýkonného plně diferenciálního operačního zesilovače a laserem trimovaných tenkovrstvých rezistorů vykazují obě rodiny nízký šum a zkreslení, vysokou rychlost přeběhu a široký výstupní rozsah. Tyto součástky jsou stabilní i při řízení obtížných zátěží a mají výstupy chráněné proti zkratu. Vše je navrženo od základů pomocí procesu komplementární dielektrické izolace společnosti THAT, oba modely integrují patentovanou technologii OutSmarts1 od THAT. Jedná se o dvousmyčkový zpětnovazební design, který zabraňuje nadměrným zemním proudům typickým pro křížově spojené výstupní stupně (CCOS) při saturaci do jednopólových zátěží. OutSmarts používá dvě individuální zpětnovazební smyčky k samostatné kontrole diferenciálního výstupního napětí a proudů v režimu common-mode, čímž činí návrhy inherentně stabilnější a méně citlivé na tolerance součástek než běžné CCOS. Výsledkem je, že topologie THAT zabraňuje ztrátě zpětné vazby v režimu common-mode, která sužuje běžné CCOS návrhy při saturaci do jednopólových zátěží. Tím se vyhýbá nadměrným zemním proudům, které by jinak narušily napájecí zdroje a vytvořily další zkreslení, i v sousedních kanálech. Model 1606 nabízí pokročilý systém redukce offsetového napětí v režimu common-mode, který vyžaduje malý jednopólový kondenzátor místo dvou elektrolytických kondenzátorů potřebných u modelu 1646. Oba modely poskytují zesílení +6 dB. Obvod je možné použít primárně jako diferencní linkový budič, v mixážních pultech, jako distribuční zesilovač, pro audio ekvalizéry, dynamické procesory, digitální efekty a telekomunikační systémy. Parametry obvodu udávané výrobcem jsou následující:

- Nízký šum: -101 dBu
- Nízké zkreslení: 0,0007 %
- Možnost pracovat do zkratu
- Napájecí napětí: *min.* $\pm 4V$ a *max.* $\pm 18V$
- Možnost práce do kapacitní zátěže
- Maximální odebíraný proud: 6 mA (bez signálu)
- Maximální zkratový proud: 70 mA (oba výstupy zkratované na zem) [16].

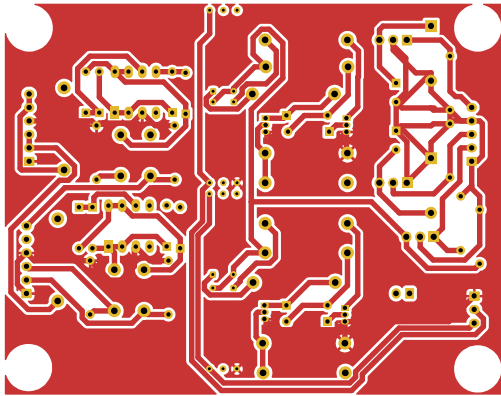
Zapojení použité v obvodu vychází z doporučeného zapojení výrobce.



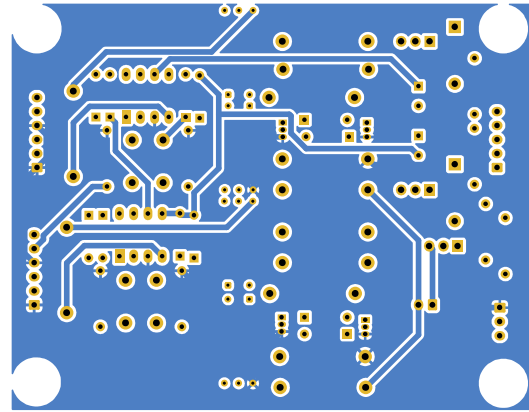
Obr. 35: Ekvivalentní zapojení obvodu THAT 1646 [16]



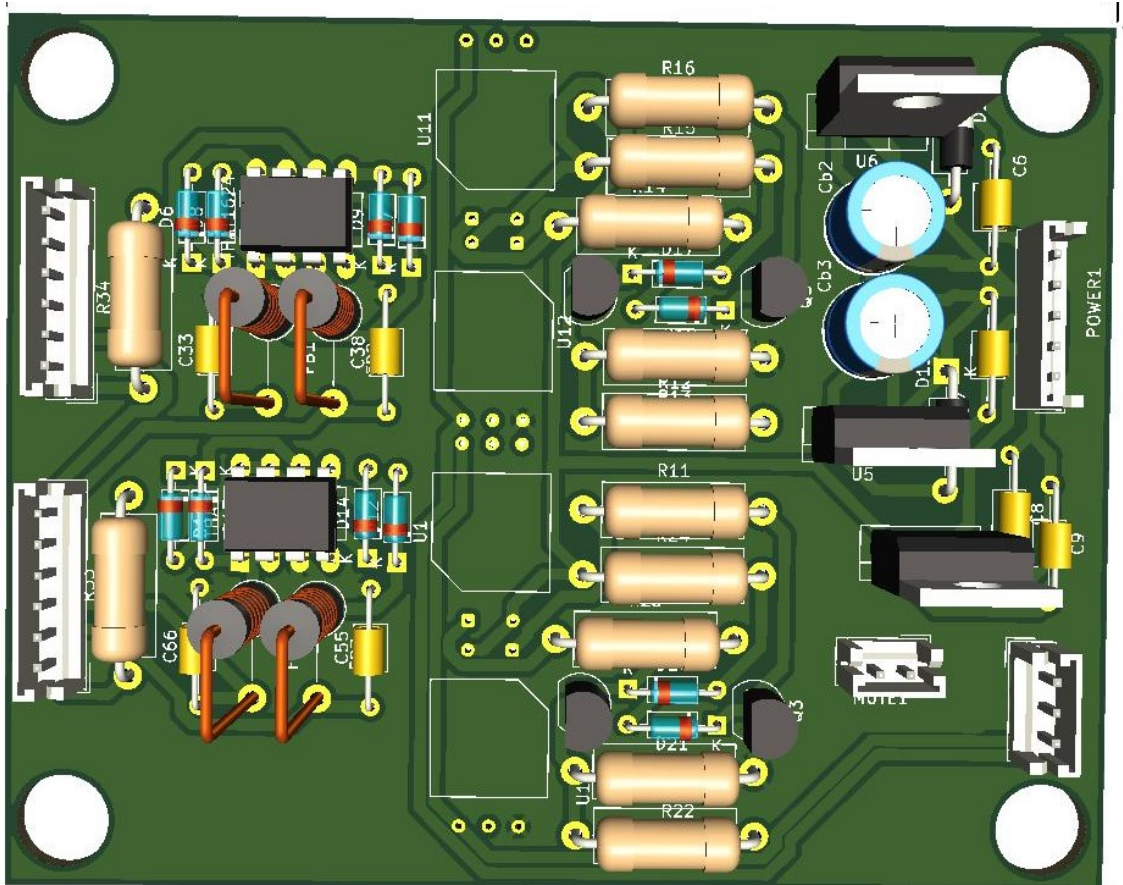
Obr. 36: Schéma zapojení výstupního bloku



Obr. 37: PCB výstupního bloku – horní strana



Obr. 38: PCB výstupního bloku – spodní strana



Obr. 39: 3D model PCB výstupního bloku

2.2.5 Obvod první části zdroje a zdrojové sběrnice

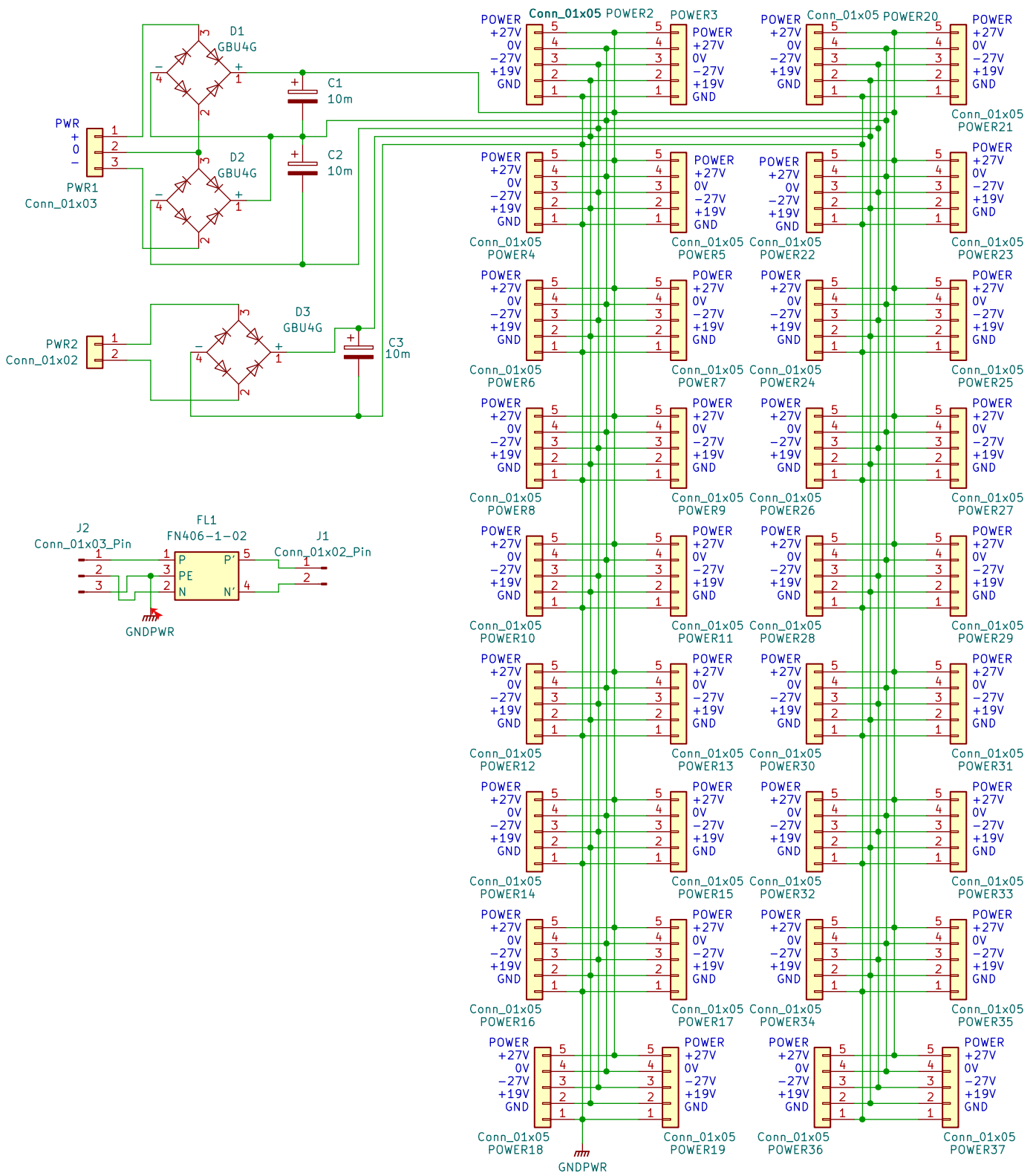
Pro napájení bylo zvoleno sběrniové uspořádání s ohledem na modularitu. Hlavní napájecí sběrnice obsahuje konektory pro připojení transformátoru, usměrňovače a napěťový meziobvod. Usměrněné a částečně stabilizované napětí pak napájí sběrnici, ke které se připojují ostatní desky zařízení. Deska poskytuje symetrické napájení a nesymetrické

napájení pro každý obvod v jednom konektoru. Součástí obvodu je také EMC filtr integrovaný v jednom pouzdře. Celkový příkon jednotlivých desek byl spočítán pro jednotlivá napětí. Potřebný proud pro integrované obvody byl uvažovaný maximální udávaný zkratový proud plus maximální proud bez signálu. Proud pro napěťové sledovače byl uvažovaný 30 mA. Pro led diody byl uvažovaný proud 30 mA na jednu. Například pro vstupní blok pro symetrické napájení je to $2 \times 25 \text{ mA} + 2 \times 8 \text{ mA} + 1 \times 30 \text{ mA} + 6 \times 30 \text{ mA}$ je 276 mA. S rezervou 20 % a zaokrouhlením je potřebný proud symetrického napájení 350 mA na jeden vstupní blok.

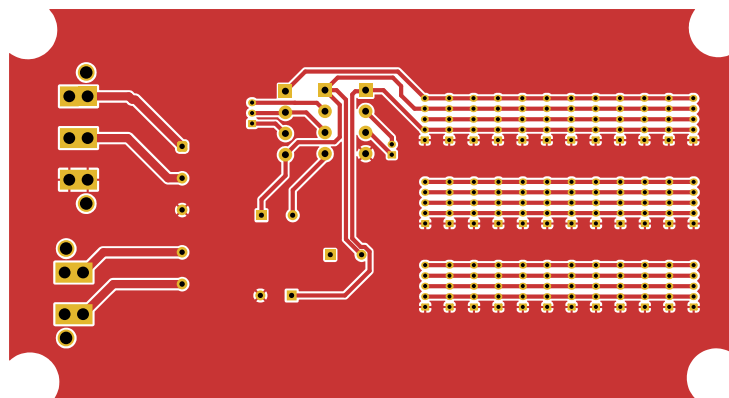
Tab. 5: Výpočet potřebného výkonu traťa a maximální odebíraný proud

	$\pm 18 \text{ V} / \text{ks}$	$+12 \text{ V} / \text{ks}$	ks	Celkem	Celkem
Vstupní bloky	350 mA	60 mA	10	3,5 A	0,6 A
Výstupní bloky	200 mA	120 mA	10	2,0 A	1,2 A
Signálová sběrnice	600 mA	100 mA	1	0,6 A	0,1 A
			SUMA	6,1 A	1,9 A
			Zaokrouhlení s 30% rezervou	8,0 A	3,0 A

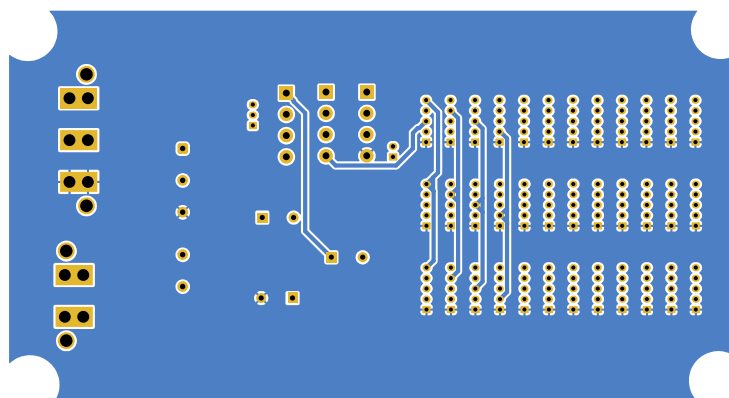
Z tabulky výše vyplývá, že bude potřeba transformátor s více vynutími, pro symetrické napětí $\pm 19\text{V}/8\text{A}$ (min. 152 VA) a pro nesymetrické $+13\text{V}/3\text{A}$ (min. 39 VA). Celkový minimální zdánlivý výkon je pak 191 VA.



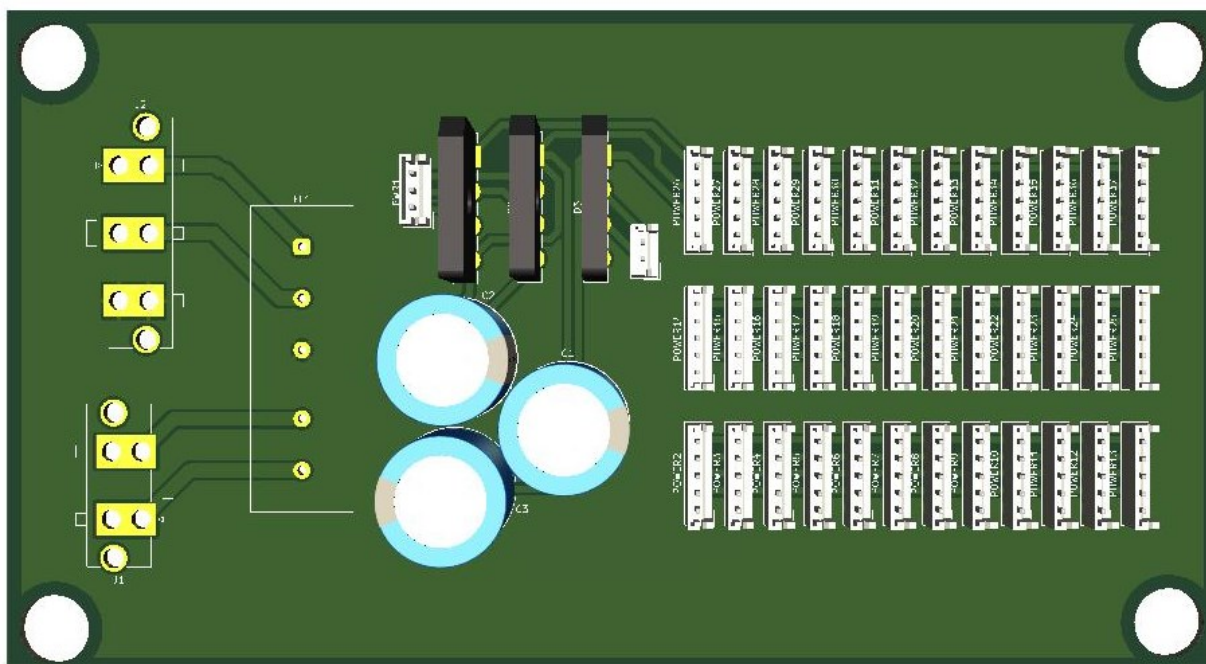
Obr. 40: Napěťová sběrnice s první částí zdroje



Obr. 41: PCB první části zdroje včetně zdrojové sběrnice – horní vrstva



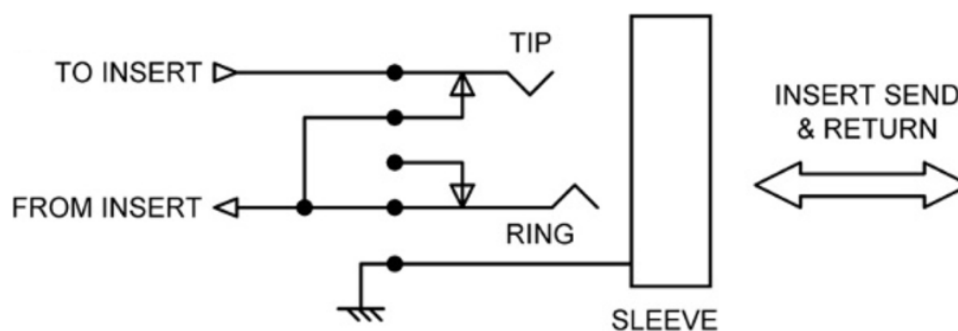
Obr. 42: PCB první části zdroje včetně zdrojové sběrnice – spodní vrstva



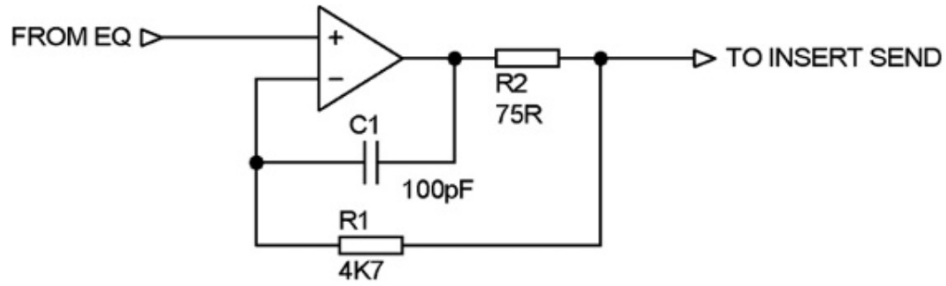
Obr. 43: 3D model první části zdroje včetně zdrojové sběrnice

2.3 Obvod signálové sběrnice

Jelikož se jedná o modulární návrh systému, signálová sběrnice je navržena jako samostatný blok, aby bylo možné měnit vstupní a výstupní obvody dle potřeby v budoucnu. Na signálové sběrnici jsou LED indikátory stejné, jako na vstupním bloku. Indikátory jsou přímo na sběrnici, aby bylo možné kontrolovat napětí sběrnice a bylo zřejmé, pokud součet signálu překročí pracovní rozsah sumáčního operačního zesilovače. Za sumáčním zesilovačem je další indikátor pro obnovení správné napěťové úrovně, který může signál zeslabit i zesílit. Následuje část obvodu, kde je možné stereo signál převést na mono signál, pomocí přepínače na předním panelu. V další části obvodu jsou budiče pro připojení dvou inzertních bodů, jejich zapojení vychází opět z knihy *Small Signal Audio Design* od Selfa Douglase. Účinný způsob, jak dosáhnout téměř nulové výstupní impedance kvůli přeslechům, je uveden na obrázku číslo 45. Zde hlavní záporná zpětná vazba pro operační zesilovač prochází rezistorem R1, z vnějšího konce izolačního rezistoru R2 a snižuje tak výstupní impedanci, zatímco stabilizující vysokofrekvenční zpětná vazba je vedena přes kondenzátor C1 z vnitřního konce, kde není ovlivněna fázovým posunem kvůli kapacitě zátěže. S touto insert send fází byla výstupní impedance snížena z 75 ohmů na méně než 1 ohm. Tato uspořádání musí být vždy pečlivě zkontrolována, aby se zajistilo, že vysokofrekvenční stabilita s kapacitní zátěží je opravdu udržena; tento obvod je stabilní při řízení zátěže 22 nF, což představuje 220 metrů kabelu s kapacitou 100 pF/m. Toto uspořádání se někdy nazývá „nulová impedance“ výstupu. Vnější zapojení inzertního bodu je realizováno pomocí jednoho Jack TRS konektoru pro úsporu místa. Konektor obsahuje jak cestu ven do externího zařízení, tak cestu zpět. Druhá možnost je využití dvou TR Jack konektorů, případně i XLR, kdy jeden konektor je pro cestu ven a druhý pro cestu zpět [5].

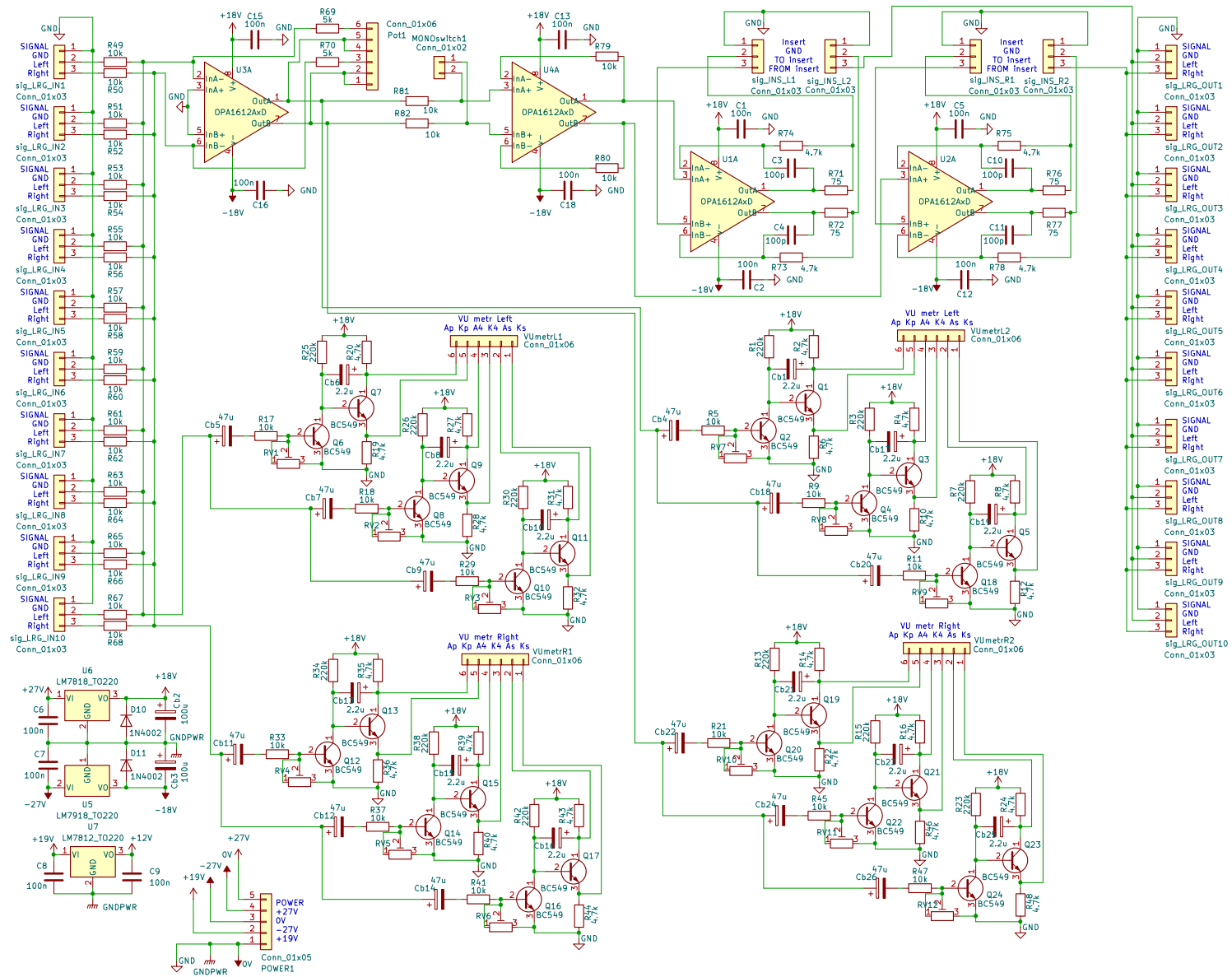


Obr. 44: Zapojení inzertního Jack konektoru [5]

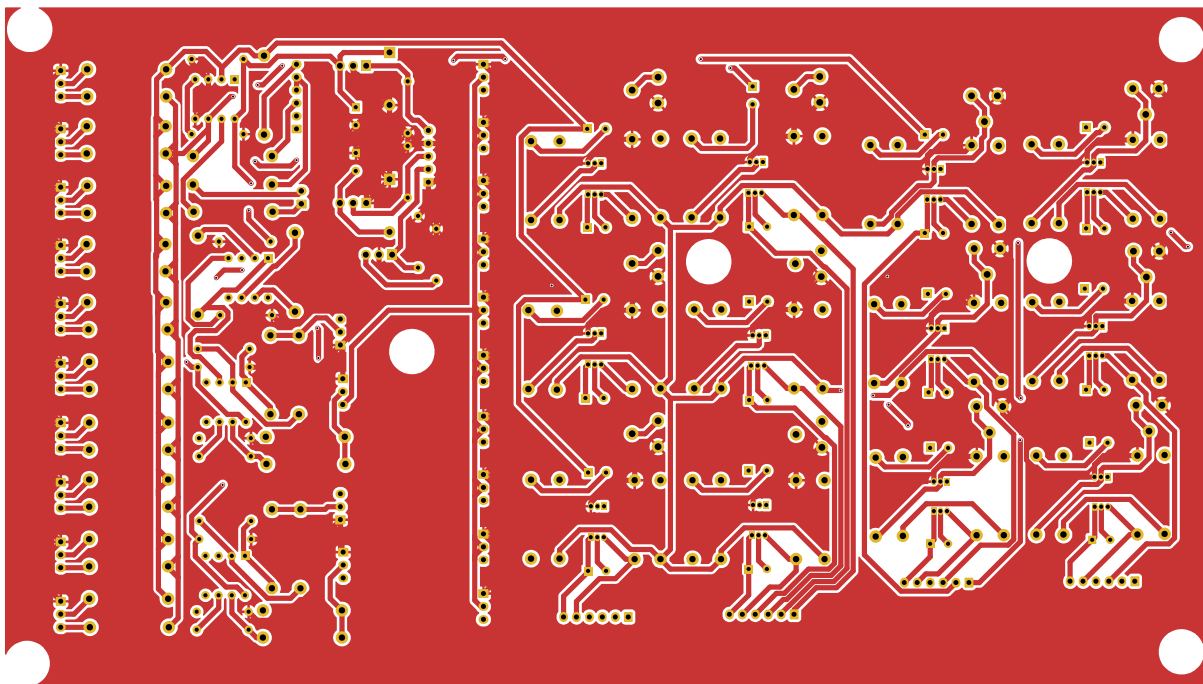


Obr. 45: Typické uspořádání pro inzertní bod v režimu "nulové impedance" výstupu [5]

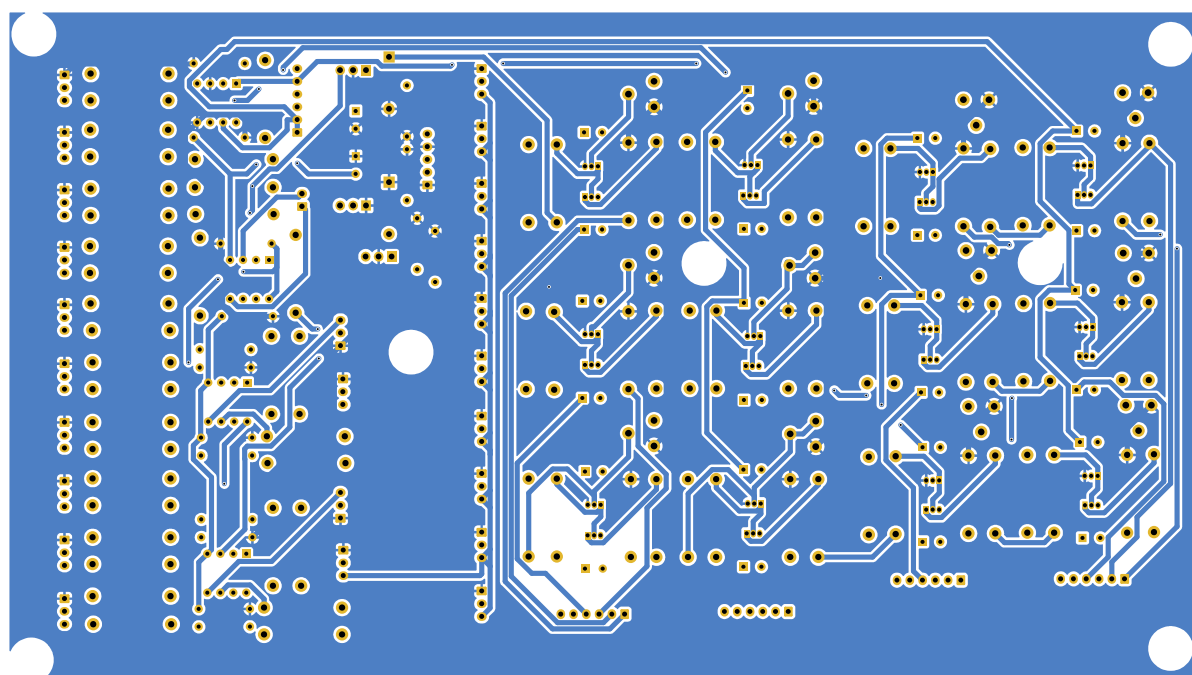
Obvod signálové sběrnice má také své napájecí zdroje ve formě stabilizátorů, jak pro symetrické, tak pro nesymetrické napětí. V tomto bloku zatím není nesymetrické napájení využito a je zde pro udržení homogenity jednotlivých bloků a jejich připojení a také jako případný zdroj pro budoucí vylepšení nebo úpravy. Desky plošných spojů jsou navrhovány tak, aby signálová cesta a napájecí cesta byly co nejkratší. Obvody pro indikátory jsou pak umístěny v druhé části PCB.



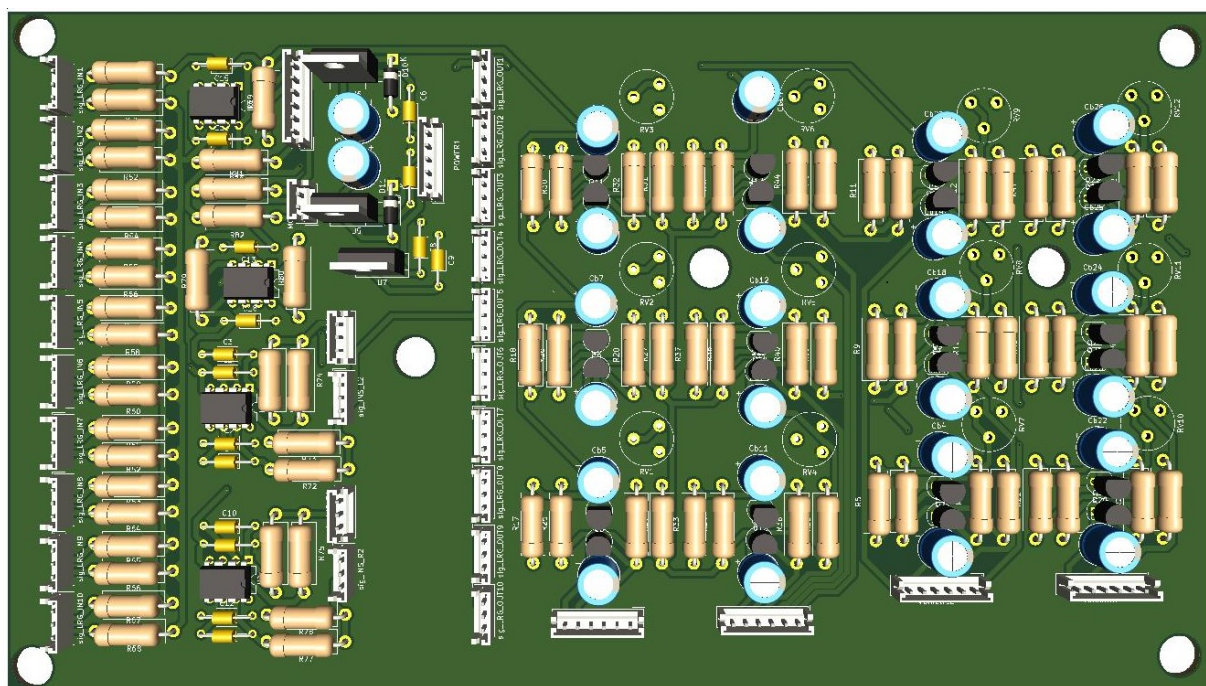
Obr. 46: Schéma signálové sběrnice



Obr. 47: PCB signálové sběrnice – horní vrstva



Obr. 48: PCB signálové sběrnice – spodní vrstva



Obr. 49: 3D model signálové sběrnice

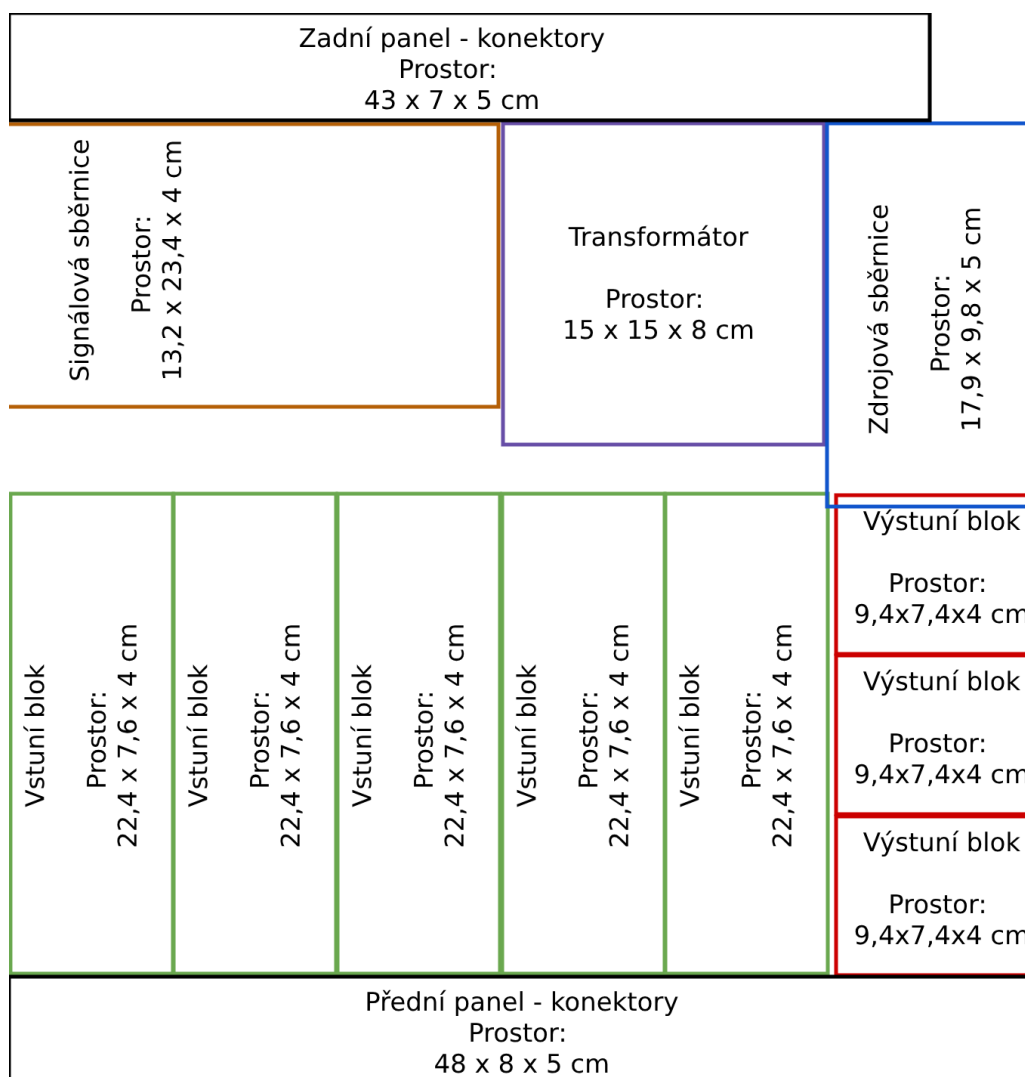
2.4 Návrh mechanické konstrukce

Tato část práce se věnuje mechanické konstrukci a uspořádání zařízení. Je proveden návrh a vizualizace předního ovládacího panelu a zadní části, kde jsou přípojná místa vstupů, výstupů a inzertních bodů. Poslední dva vstupy a výstupy jsou paralelně vyvedeny i na přední panel, aby bylo možné „mobilní“ připojení při instalovaném zařízení, bez potřeby deinstalace zařízení z jeho umístění. Jsou doplněny také konektory pro inzertní body ze stejného důvodu. Konstrukce je zasazena do formátu 19“ rack s výškou 2U. To znamená, že vnitřní rozměry boxu pro instalaci elektroniky jsou přibližně 48 cm na šířku, 8,5 cm na výšku a 50 cm do hloubky. Uspořádání jednotlivých bloků je na obrázku číslo 50, Vstupní bloky (10 ks) budou umístěny v řadě vedle sebe ve dvou patrech nad sebou, stejně tak výstupní bloky (6 ks).

Rozměry jsou v tabulce určeny z pohledu půdorysu, šířka je horizontální rovina, hloubka vertikální a výška je axiální rovina. V návrhu uspořádání jsou pak výchozí hodnoty z návrhu DPS.

Tab. 6: Rozměry jednotlivých bloků

Rozměry bloků	Šířka	Hloubka	Výška
Vstupní blok	7,6 cm	22,4 cm	4 cm
Výstupní blok	9,4 cm	7,4 cm	4 cm
Signálová sběrnice	23,4 cm	13,2 cm	4 cm
Zdrojová sběrnice	9,8 cm	17,9 cm	5 cm
Transformátor	15 cm	15 cm	8 cm
Přední panel	48 cm	5 cm	8 cm
Zadní panel	43 cm	5 cm	7 cm



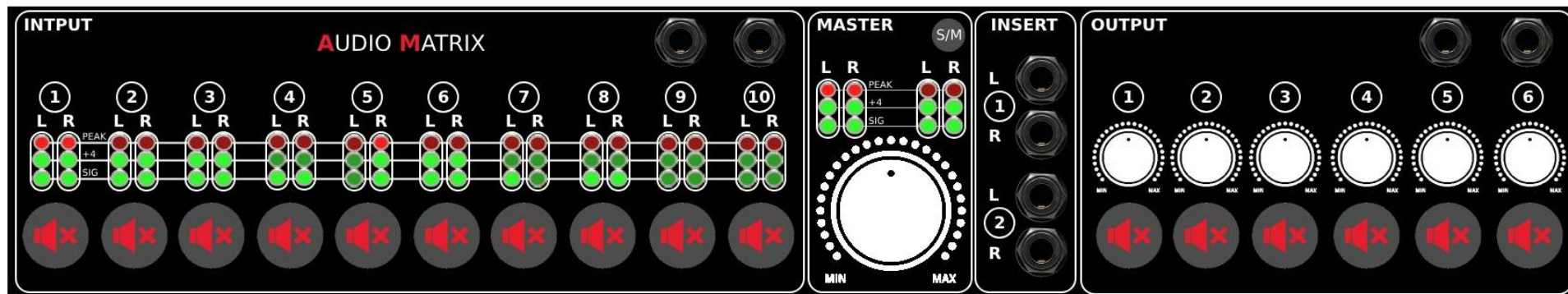
Obr. 50: Vnitřní uspořádání jednotlivých bloků v boxu

2.4.1 Návrh předního panelu

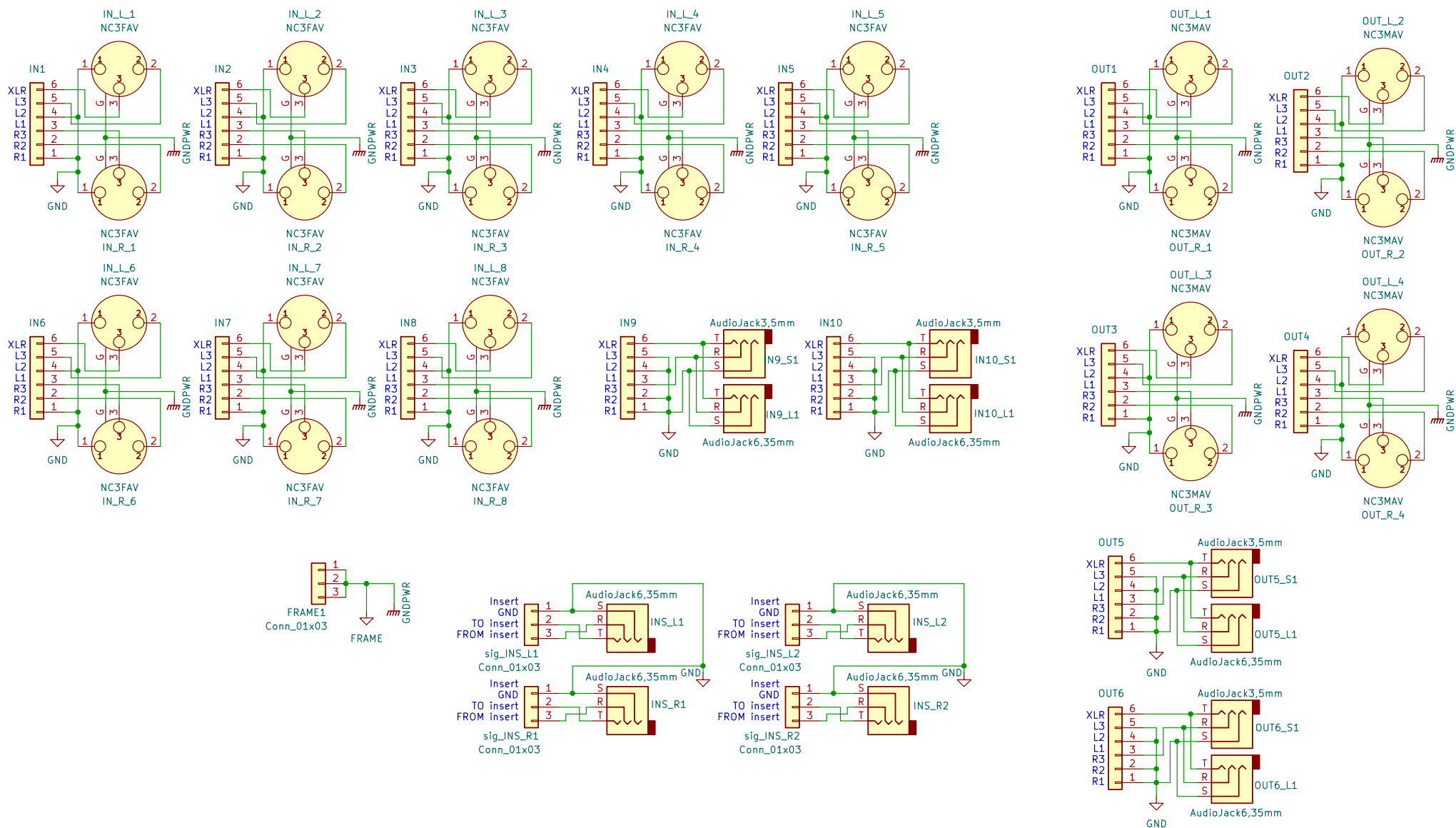
Rozmístění jednotlivých indikátorů a tlačítek, jak u vstupních, tak u výstupních bloků je umístěno na předním panelu. Rozměry panelu vychází z 2U 19“ formátu. Ovládací panel je rozdělen do 4 logických celků, které korespondují i se signálovou cestou ve smyslu zleva doprava. V levé části jsou umístěny indikátory a ovládání všech vstupních bloků následně je indikace a nastavení zisku sumačního zesilovače včetně přepínání stereo a mono signálu, následně jsou k dispozici dva inzertní body a v poslední části je poměrové ovládání hlasitosti všech výstupů včetně jejich MUTOVÁNÍ.

2.4.1 Návrh zadního panelu

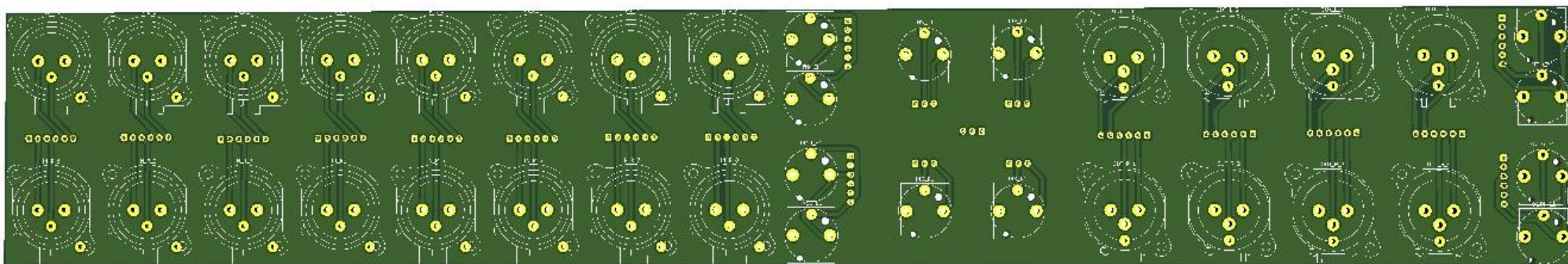
Zadní panel je pro snadnější a přesnější montáž a výrobu také navržen jako PCB, kde jsou umístěny všechny konektory vstupů, výstupů i inzertních bodů. Panel je menší než celková šířka boxu, protože vedle panelu je prostor pro umístění napájecího konektoru s pojistkou. Připojení jednotlivých vstupů i výstupů je pomocí konektorů a je tak možné spojovat a odpojovat jednotlivé desky bez následného pájení, což podporuje modulární architekturu.



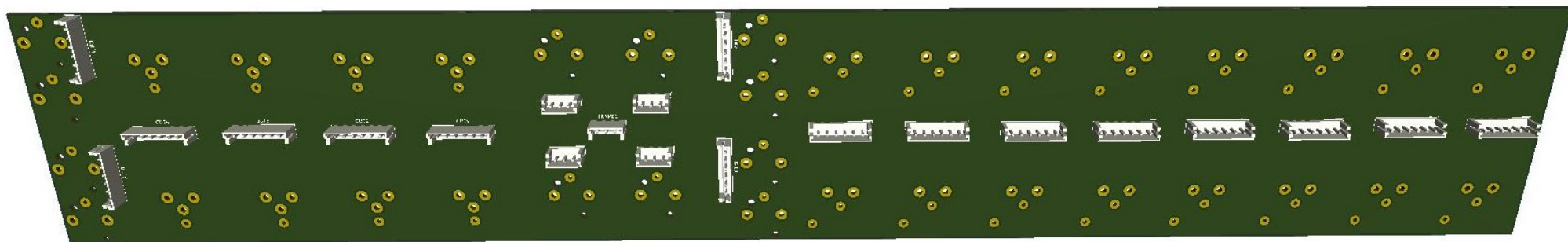
Obr. 51: Vizualizace předního ovládacího panelu



Obr. 52: Schéma konektorové části zadního panelu



Obr. 53: PCB konektorové části zadního panelu – přední strana



Obr. 54: PCB konektorové části zadního panelu – zadní strana

Zhodnocení a závěr

Tato diplomová práce se věnuje návrhu a realizaci audio přepínače pro akustickou laboratoř Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Hlavním cílem bylo vytvořit zařízení, které umožňuje přepínání několika vstupních audio signálů na více výstupů s minimálním dopadem na kvalitu signálu a bez slyšitelných přepínacích efektů. V teoretické části práce byla podrobně analyzována problematika klíčových parametrů audio zařízení. Byly rozebrány aspekty jako úrovně signálu, vstupní a výstupní impedance, šum, odstup signálu od šumu, dynamický rozsah, harmonické zkreslení a různé typy vedení audio signálu. Dále byly probrány různé typy zesilovačů a metody přepínání a směšování signálů, což poskytlo teoretický základ pro praktickou realizaci. Praktická část zahrnovala definici požadavků, návrh zapojení a mechanické konstrukce zařízení. Byly vytvořeny a popsány jednotlivé obvody, návrh plošných spojů a mechanické uspořádání zařízení. Návrh zařízení zahrnoval několik modulů, což umožňuje snadnou údržbu a případné rozšíření funkcionality. Navržené zařízení teoreticky splňuje všechny stanovené požadavky. Další fáze je odměření navržených obvodů a vzájemná integrace s finálním testováním. Tato práce realizovala komplexní návrh celého zařízení a poskytla vhled do teoretických základů nezbytných pro pochopení a řešení problematiky přepínání a směšování audio signálů. Výsledné zařízení bude po dokončení přinášet praktický přínos pro akustickou laboratoř a bude moci sloužit jako základ pro další inovace v této oblasti. Díky modulárnímu řešení je možné v budoucnu pokračovat v inovování zařízení po částech a testovat například více typů vstupních a výstupních obvodů vedle sebe. Díky dostatečnému počtu lze toto realizovat při souběžném používání nyní navrhovaného řešení a srovnávat tak inovace se současným návrhem. Navržený ovládací panel a konstrukce ve vizualizacích působí moderně a je dle autora konkurenceschopná proti komerčně prodávaným zařízením.

Literatura

- [1] ORAVSKÝ, Luděk (2004). *Decibely ve zvukových zařízeních. Základní pojmy*. Online. In: Music Store, 03. 2024 Dostupné z: <https://www.music-store.cz/clanky/decibely-ve-zvukovych-zarizenich> [citováno 2024-05-02].
- [2] VALENTA, Jaroslav (bez data). *Úroveň signálu, útlum a zisk*. Online. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~vargaj/U%20S%20T/ÚROVEŇ.pdf> [citováno 2024-05-05].
- [3] Biamp. (bez data). *Gain structure: input and output levels*. Online. Dostupné z: https://support.biamp.com/General/Audio/Gain_structure%3A_input_and_output_levels. [citováno 2024-05-03].
- [4] VALACH, Ondřej, 2019. Hybridní mikrofonní předzesilovač. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [5] SELF, Douglas. *Small signal audio design*. Oxford: Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0.
- [6] SHERMAN, Charles a BUTLER, John. *Transducers and Arrays for Underwater Sound*. Springer Science & Business Media. ISBN 9780387331393.
- [7] SELF, Douglas. *Audio Power Amplifier Design Handbook*. Oxford: Focal Press, 2009. ISBN 978-0-240-52162-6
- [8] Aviom (bez data). *What's the Difference Between Balanced and Unbalanced?* Online. Dostupné z: <https://www.aviom.com/blog/balanced-vs-unbalanced/>. [citováno 2024-05-05].
- [9] Musical Fidelity (bez data). *XLR Connector Wiring*. Online. Dostupné z: <https://www.musicalfidelity.com/support/xlr-wiring>. [citováno 2024-05-02].
- [10] KRA, David (2020). *Are speaker cables TRS?* Online. Dostupné z: <https://www.quora.com/Can-I-use-a-TS-cable-in-a-TRS-jack>. [citováno 2024-05-05].
- [11] EETimes (bez data). *The RCA phone plug: An outdated relic?* Online. Dostupné z: https://www.eetimes.com/the-rca-phono-plug-an-outdated-relic/?_ga. [citováno 2024-05-05].
- [12] Pinterest (bez data). *How to Wire a Stereo Jack to RCAs*. Online. Dostupné z: <https://www.pinterest.com/pin/httpwwwmediacollegecomaudioconnectionjackstereorca2html--389420699014880635/>. [citováno 2024-05-03].

-
- [13] Pinterest (bez data). *Xlr Wiring Diagram PDF/Wiring Diagram Image*. Online. Dostupné z: <https://www.pinterest.com/pin/676314069040087051/>. [citováno 2024-05-04].
- [14] Elliott Sound Products (2015). *Muting Circuits For Audio*. Online. Dostupné z: <https://sound-au.com/articles/muting.html>. [citováno 2024-05-03].
- [15] THAT Corporation. *InGenius High-CMRR Balanced Input Line Reseiver ICs. THAT 1200, 1203, 1206*. Ver. 01. THAT Corporation, 11.05.2017. [citováno 2024-05-15]. Dostupné z: https://thatcorp.com/datashts/THAT_1200-Series_Datasheet.pdf
- [16] THAT Corporation. *utSmarts Balanced Line Driver ICs THAT 1606, 1646*. Ver. 07. THAT Corporation. 07.07.2015. [citováno 2024-05-15]. Dostupné z: https://thatcorp.com/datashts/THAT_1606-1646_Datasheet.pdf

Seznam tabulek

Tab. 1: Odporů a jejich Johnsonův šum [5].....	- 6 -
Tab. 2: Jak se šum typu "shot noise" mění s proudem [5].....	- 7 -
Tab. 3: Sčítání nekorelovaných zdrojů šumu [5].....	- 8 -
Tab. 4: Jak tolerance rezistorů ovlivňují teoretický CMRR [5]	- 11 -
Tab. 5: Výpočet potřebného výkonu trať a maximální odebíraný proud.....	- 48 -
Tab. 6: Rozměry jednotlivých bloků	- 56 -

Seznam obrázků

Obr. 1: Symetrické propojení ukazující vlivy na CMRR (Common-Mode Rejection Ratio) [5].	- 10 -
Obr. 2: Princip rušení u nesymetrického vedení [8].	- 13 -
Obr. 3: Princip rušení u symetrického vedení [8].	- 14 -
Obr. 4: Základní zapojení symetrického vstupního zesilovače [5].	- 15 -
Obr. 5: Vizualizace XLR konektoru [9].	- 16 -
Obr. 6: Srovnání TS, TRS a TRRS Jack konektoru [10].	- 16 -
Obr. 7: Princip RCA konektoru [12].	- 17 -
Obr. 8: Možnosti symetrického a nesymetrického zapojení různých typů konektorů a zapojení inzertních kabelů [13].	- 18 -
Obr. 9: Napěťový neinvertující zesilovač [5].	- 19 -
Obr. 10: Transkonduktanční zesilovač [5].	- 20 -
Obr. 11: Transimpedanční zesilovač [5].	- 21 -
Obr. 12: Znárodnění problému kapacity spínačů [5].	- 22 -
Obr. 13: Příklad zapojení miniaturního relé pro mutování signálu [14].	- 23 -
Obr. 14: Příklad zapojení mutování signálu pomocí dvou JFET tranzistorů [14].	- 24 -
Obr. 15: Příklad zapojení mutování signálu pomocí dvou BJT tranzistorů [14].	- 25 -
Obr. 16: Příklad jednoduchého sumačního operačního zesilovače [5].	- 26 -
Obr. 17: Příklad zapojení nesymetrického předzesilovače [5].	- 27 -
Obr. 18: Základní zapojení symetrického vstupního předzesilovače s EMC ochranou a blokováním DC [5].	- 27 -
Obr. 19: Schéma zapojení pro kombinaci nesymetrického a symetrického vstupu v jednom [5].	- 28 -
Obr. 20: Příklad zapojení impedančně symetrického nesymetrického výstupu [5].	- 29 -
Obr. 21: Příklad zapojení výstupu s "nulovou impedancí" [5].	- 29 -
Obr. 22: Příklad jednoduchého napájecího symetrického zdroje [5].	- 32 -
Obr. 23: Možné schéma zapojení symetrického zdroje s ochrannými diodami a decoupling kondenzátory (C7, C8) [5].	- 32 -
Obr. 24: Úrovňový diagram první část.	- 35 -
Obr. 25: Úrovňový diagram druhá část.	- 36 -
Obr. 26: Fyzické propojení bloků.	- 37 -

Obr. 27: Ekvivalentní blokové zapojení ve 3 verzích rozsahu vstupního signálu pro zisk 0 dB (THAT1200), zisk -3 dB (THAT1203) a zisk -6 dB (THAT1206) [15]	- 39 -
Obr. 28: Schéma zapojení pro testování obvodu a ověření parametrů [15]	- 39 -
Obr. 29: Použitý obvod pro mutování signálu [14]	- 40 -
Obr. 30: Jednoduchý unipolární LED detektor dosaženého napětí [5]	- 41 -
Obr. 31: Schéma zapojení vstupního bloku.....	- 42 -
Obr. 32: PCB vstupního bloku – horní strana	- 43 -
Obr. 33: PCB vstupního bloku – spodní strana	- 43 -
Obr. 34: 3D model PCB vstupního bloku	- 43 -
Obr. 35: Ekvivalentní zapojení obvodu THAT 1646 [16]	- 45 -
Obr. 36: Schéma zapojení výstupního bloku.....	- 46 -
Obr. 37: PCB výstupního bloku – horní strana	- 47 -
Obr. 38: PCB výstupního bloku – spodní strana	- 47 -
Obr. 39: 3D model PCB výstupního bloku	- 47 -
Obr. 40: Napěťová sběrnice s první částí zdroje	- 49 -
Obr. 41: PCB první části zdroje včetně zdrojové sběrnice – horní vrstva	- 50 -
Obr. 42: PCB první části zdroje včetně zdrojové sběrnice – spodní vrstva	- 50 -
Obr. 43: 3D model první části zdroje včetně zdrojové sběrnice	- 50 -
Obr. 44: Zapojení inzertního Jack konektoru [5]	- 51 -
Obr. 45: Typické uspořádání pro inzertní bod v režimu "nulové impedance" výstupu [5].....	- 52 -
Obr. 46: Schéma signálové sběrnice	- 53 -
Obr. 47: PCB signálové sběrnice – horní vrstva	- 54 -
Obr. 48: PCB signálové sběrnice – spodní vrstva	- 54 -
Obr. 49: 3D model signálové sběrnice	- 55 -
Obr. 50: Vnitřní uspořádání jednotlivých bloků v boxu.....	- 56 -
Obr. 51: Vizualizace předního ovládacího panelu.....	- 58 -
Obr. 52: Schéma konektorové části zadního panelu.....	- 59 -
Obr. 53: PCB konektorové části zadního panelu – přední strana.....	- 60 -
Obr. 54: PCB konektorové části zadního panelu – zadní strana	- 60 -