



Fakulta elektrotechnická

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Úprava vícekanálového audio převodníku pro měřicí účely

Autor práce: Bc. Tomáš Kučera

Vedoucí práce: Ing. Oldřich Tureček, PhD.

Plzeň 2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akadémický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš KUČERA**

Osobní číslo: **E16N0068P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**

Název tématu: **Úprava vícekanálového audio převodníku pro měřicí účely**

Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Prostudujte možnosti použití profesionálního převodníku ADA 8000 pro měřicí účely.
2. Navrhněte vhodnou úpravu vstupních obvodů převodníku ADA 8000 pro účely akustických měření.
3. Navrženou úpravu realizujte a ověřte parametry celého upraveného převodníku.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

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

Seznam odborné literatury:

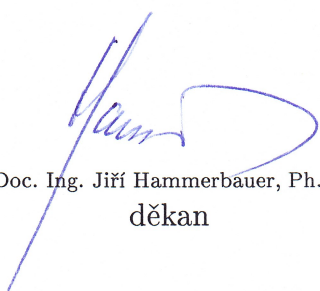
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**

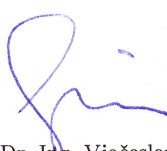
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Cílem práce je prostudovat možnosti použití profesionálního převodníku Behringer ADA8000 pro měřicí účely, navrhnout úpravu vstupních obvodů převodníků a úpravu realizovat a ověřit. Důvodem pro vznik této práce je nalezení finančně dostupného řešení měřicího systému mikrofonního pole, které obsahuje desítky mikrofonů a je tedy zapotřebí desítek vstupních kanálů pro zvukový záznam a následné zpracování naměřených dat. Úprava konkrétně tohoto zařízení má více důvodů, jedním z nich je kvalita použitých AD převodníků. Vstupní obvody mikrofonních předzesilovačů však vykazují technické nedostatky, jako např. nárůst zkreslení pro nízké signálové úrovně, nedostatečný rozsah vstupních napětí a další problémy.

Vzhledem k požadovaným parametrům a množství potřebných převodníků vychází úprava ADA8000 levněji, než použití kvalitativně vyhovujících výrobků, které jsou k dispozici na trhu, např. výrobky značky RME.

Konstrukce je realizována pomocí moderních integrovaných mikrofonních předzesilovačů od firmy THAT. Tyto obvody ve vhodném zapojení s použitím nízkého počtu externích součástek vykazují mnohonásobně lepší parametry, než běžné kvazi-komplementární zapojení se čtyřmi tranzistory a operačním zesilovačem. Jedná se o šumové parametry, zkreslení harmonické i intermodulační, vstupní napěťový rozsah, odolnost proti souhlasnému signálu, proti zvlnění napájecího napětí a mnoho dalších.

Klíčová slova

AD převodník, převodník, mikrofonní předzesilovač, předzesilovač, mikrofonní zesilovač, THAT1512, zvuková karta

Abstract

Kučera, Tomáš. *Modification of multi-channel audio converter for measurement application* [Úprava vícekanálového audio převodníku pro měřicí účely]. Pilsen, 2018. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications.
Supervisor: Ing. Oldřich Tureček, PhD.

The aim of this work is to analyse the professional converter Behringer ADA8000 ways of use for measurement proposes and to suggest, implement and verify the alternation of convertor's input circuits. The theses propose is to find out a commercially available solution of microphone field measurement system. The system contains tens of microphones, so then tens of input channels for audio records and for processing of measured data is required. The first reason for the convertor modification is the quality of utilized AD convertors. The input circuits of microphone amplifiers present some technical deficits, such as noise, distortion, insufficient range of input voltages and so on.

When the required parameters and the big amount of needed sound cards are considered, the ADA8000 alternation shows to be cheaper than when the qualitatively suitable products available on the market, such as RME products, are applied. The modern integrated microphone pre-amplifiers developed by the THAT company are utilized for the construction. These circuits, when they are used in suitable connection with small number of external components, provide better parameters than the common quasi-complementary circuits with four transistors and one operational amplifier. The parameters which are improved by the modified circuit are for example: the noise parameters, the harmonic and intermodulation distortion, the input voltage range, common mode range ratio and power supply rejection ratio and many others.

Keywords

AD converter, converter, microphone preamplifier, preamplifier, microphone amplifier, THAT1512, sound card

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 1. Června 2018

Bc. Tomáš Kučera

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratek	x
1 Úvod	1
2 Využití převodníku pro měřicí účely	2
2.1 Možnosti využití mikrofonních předzesilovačů v měřicí technice	2
2.1.1 Měření difuzity	3
2.2 Volba komponent systému pro měření difuzity	6
3 Behringer ADA8000, požadavky na úpravu	9
3.1 Vlastnosti převodníku	9
3.2 Naměřené parametry	12
3.3 Požadované parametry	17
4 Návrh mikrofonního předzesilovače pro ADA8000	19
4.1 Mechanická koncepce	19
4.2 Volba použitých součástek	21
4.2.1 Integrovaný mikrofonní předzesilovač THAT1512	21
4.2.2 Rezistory	22
4.2.3 Kondenzátory	22
4.2.4 Ostatní aktivní komponenty	24
4.3 Návrh modulu zesilovače	25
4.4 Návrh stejnosměrného serva	28

4.5	Návrh indikace a ovládání fantomového napájení	29
4.6	Návrh desek plošných spojů	32
5	Realizace a měření	34
5.1	Realizace a měření	34
5.2	Indikátory přebuzení	38
5.3	Cenová kalkulace	39
6	Závěr	40
	Reference, použitá literatura	41
	Přílohy	42
A	Schémata zapojení	42
B	Deska plošných spojů	47

Seznam obrázků

2.1	Příklad naměřeného a zaznamenaného singálu jednoho z mikrofonů při měření difuzity, převzato z [4]	3
2.2	Zobrazení celého měřicího systému pro měření difuzity	7
2.3	Fotografie rackového boxu obsahující elektroniku pro měření difuzity	8
2.4	Fotografie kompletního měřicího systému realizovaného na FEL	8
3.1	Osmikanálový AD převodník Behringer, model ADA8000	9
3.2	Odstup signálu od šumu a harmonického zkreslení při zisku 10 dB v závislosti na vstupním napětí	14
3.3	Odstup intermodulačního zkreslení dle SMPTE (Dva sinusové průběhy o frekvencích 60 Hz a 7 kHz s poměrem amplitud 4:1) při nastaveném zisku 10 dB v závislosti na vstupním napětí	15
3.4	Blokové schéma převodníku Behringer ADA8000	16
4.1	Výkres čelního hliníkového panelu ADA8000	20
4.2	Závislost zesílení integrovaného obvodu THAT1512 na hodnotě rezistoru R_g	21
4.3	Náhradní zapojení elektrolytického kondenzátoru	23
4.4	Schéma zapojení mikrofonního předzesilovače THAT1512	26
4.5	Schéma zapojení stejnosměrného serva pro dva mikrofonní předzesilovače	28
4.6	Schéma zapojení indikačních LED diod pro přítomnost signálu a přebuzení	30
4.7	Schéma zapojení polarizačního a fantomového napájení a jeho řízení, indikace synchronizace a režim „master”	31
4.8	Náhled návrhu desek plošných spojů pro jeden kanál	32
5.1	Odstup signálu od šumu a harmonického zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 10 dB	35

5.2	Odstup signálu od šumu a harmonického zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 30 dB	35
5.3	Odstup signálu od šumu a harmonického zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 60 dB	36
5.4	Odstup intermodulačního zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 10 dB	36
5.5	Odstup intermodulačního zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 30 dB	37
5.6	Odstup intermodulačního zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 60 dB	37
A.1	Blokové schéma převodníku Behringer ADA8000	43
A.2	Blokové schéma a schéma napájení předzesilovačů	44
A.3	Schéma zapojení jednoho modulu předzesilovače	45
A.4	Schéma zapojení jednoho modulu stejnosměrného serva	46
B.1	Motivy plošného spoje v měřítku 1:2	48
B.2	Osazovací výkresy plošného spoje v měřítku 1:2	49

Seznam tabulek

3.1	Katalogové údaje převodníku ADA8000	10
3.2	Naměřené hodnoty dynamického rozsahu převodníku pro buzení -3 dBFs pro původní řešení.	12
3.3	Tabulka požadovaných parametrů pro mikrofonní předzesilovač	18
5.1	Naměřené hodnoty dynamického rozsahu převodníku pro buzení -3 dBFs pro původní řešení	38
5.2	Cenový odhad nákladů pro pořízení AD převodníků	39

Seznam symbolů a zkratek

THD	Celkové harmonické zkreslení
THD + N	Celkové harmonické zkreslení a šum
THD Ratio	Odstup signálu od zkreslení
THD + N Ratio	Odstup signálu od zkreslení a šumu
IMD	Intermodulační zkreslení
IMD Ratio	Odstup intermodulačního zkreslení
DPS	Deska plošných spojů
RMS	Střední efektivní hodnota.
SPL	Hladina akustického tlaku.
AD/DA	Analogově digitální / digitálně analogový převodník

1

Úvod

Tato práce je zaměřena na úpravu mikrofonních předzesilovačů audio převodníku Behringer ADA8000. Jedná se o osmivstupý AD/DA převodník se schopností provozu osmi kanálů při vzorkovací frekvenci 48 kHz. Ve školních laboratořích FEL je tento převodník využíván pro účely měření difuzity. V rámci tohoto měřicího systému je využito 6 kusů převodníků, další dva kusy jsou určeny pro jiné měřicí účely.

Nedostatky stávajícího řešení jsou podrobně popsány v této práci. Nejedná se však o nedostatky, které by vedly k nemožnosti použití těchto převodníků v měřicím řetězci. Pro přesnost měření je však nutné dosáhnout lepších parametrů. Volba jiného osmikanálového převodníku patřičné kvality by z hlediska ceny byla méně vhodná, jelikož takové převodníky dosahují řádově vyšších cenových hladin.

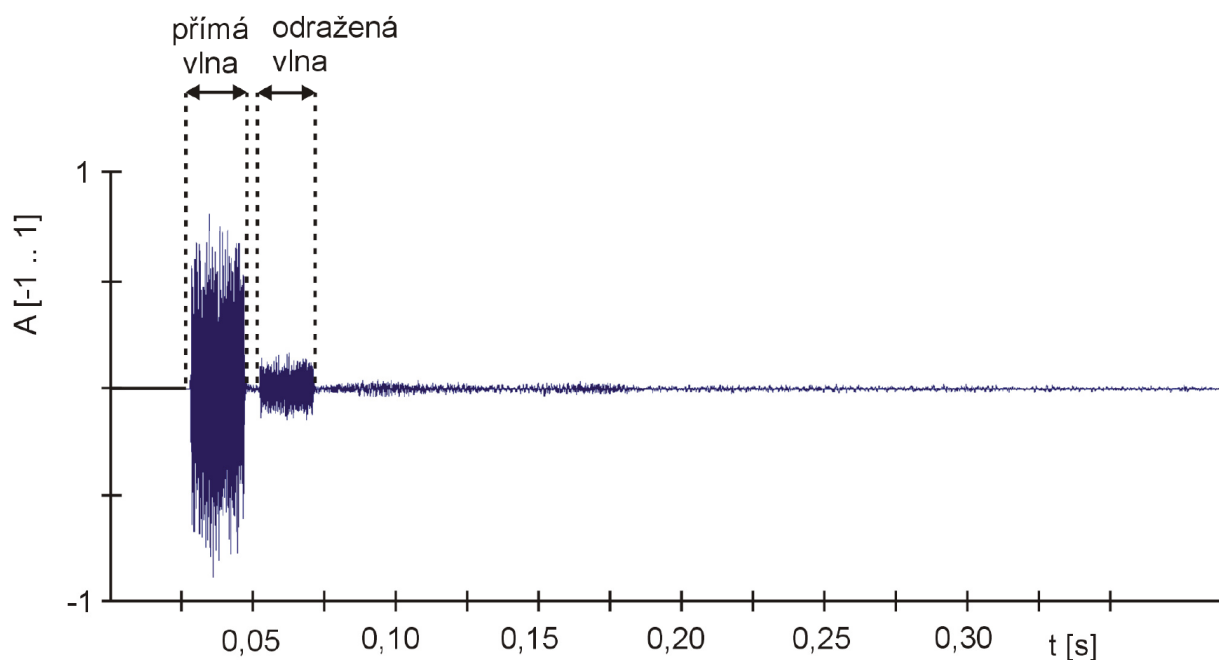
Důležitá informace je, že měřicí systém je již postaven a plně funkční. Jeho parametry by měly být vylepšeny s pokud možno co nejmenším zásahem do celého systému, který by znamenal další výdaje a možný vznik komplikací funkčnosti celého systému, komplikace se zástavbou a další jiné. Z těchto důvodů je tato práce orientována přímo na úpravu AD převodníku Behringer ADA8000, které jsou z hlediska vylepšení parametrů měření klíčové. Aby nebyla úprava příliš složitá, je třeba dodržet mechanické uspořádání šasi přístroje a realizovat úpravy pouze výměnou, přidáním, nebo úpravou elektroniky.

2

Využití převodníku pro měřicí účely

2.1 Možnosti využití mikrofonních předzesilovačů v měřicí technice

Akustika je velmi široký obor, který se dělí na mnoho kategorií, jako jsou prostorová akustika, stavební akustika, fyziologická akustika a mnoho dalších. Existuje spousta parametrů, které lze v rámci akustiky měřit, například pohltivost materiálů, doba dozvuku v místnosti, charakteristiky ozvučovacích sestav, úroveň hluku zařízení atd. Ve většině případů se pro měření používá měřicí mikrofon, je ale možné využít i jiných mikrofonů, mají-li vhodné parametry. Signál z mikrofonů musí být vždy zesílen a zpracován, popřípadě uložen do paměti. Měření lze provádět přímo ve speciálních analyzátoch, nebo lze například vytvořit digitální záznam a ten poté zpracovat v některém ze softwarů, např. v MATLABu. Jedním ze speciálních měření, které se na Fakultě Elektrotechnické v Plzni provádí, je měření difuzity. K tomuto měření je zapotřebí několik zdrojů akustického výkonu a mikrofonní pole o určité geometrii. Zjednodušeně řečeno se jedná o měření, kdy je ze zdroje zvuku vyslán měřicí signál, který je pomocí mikrofonů zaznamenáván spolu s odraženým zvukem od předmětu. Ten je zachycen s časovou prodlevou danou vzdáleností mikrofonu od předmětu. Poté je pomocí výpočtů měření vyhodnoceno offline. Příklad výsledného naměřeného signálu z jednoho kanálu měření je uveden na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Příklad naměřeného a zaznamenaného singálu jednoho z mikrofonů při měření difuzity, převzato z [4]

2.1.1 Měření difuzity

Při měření difuzity je měřen odražený akustický signál od předmětu, difuzoru. Projekt který se tímto měřením zabývá byl realizován na ZČU FEL pod číslem MPO FR-TI4/569. Veškeré podrobnosti o principu měření jeho průběžích jsou k nalezení v dokumentu [4].

Měření je prováděno impulzní metodou a může probíhat v dostatečně velké hale, přestože nemá bezodrazové stěny, splňuje-li dostatečné rozměrové parametry. Princip měření je založen na vzniku tzv. „bezodrazové zóny“, kdy je měřicí impuls vytvořen zdrojem akustického tlaku (reproduktorem), snímán mikrofony. Poté se akustická vlna odrazí od difuzoru a následně mikrofony zaznamenají i odražený signál. Po tuto dobu nesmí dojít ke snímání signálu odraženého od kterékoliv stěny místnosti. Po zaznamenání postupně i odražené vlny dochází v dané hale k dozvuku, kterému nelze zabránit, ale vůči měření je již nepodstatný. Když po určité době dojde k poklesu akustického tlaku vlivem odrazů, může být měření opakováno. Výhoda tohoto měření je tedy odstranění nutnosti využití bezodrazové komory velkých rozměrů, daní za tuto výhodu je však vyšší časová náročnost měření. Ta však v případech takového měření nebývá zásadní nevýhodou vůči výhodě snadné realizace měření.

Pro výběr komponent systému je také zapotřebí znát frekvenční rozsah měření, který

odpovídá 100 Hz až 10 kHz. Nižší kmitočty nejsou brány v úvahu vzhledem k vlnové délce, která převyšuje nejen schopnosti difuzorů daných rozměrů, ale také by kladla nároky na geometrii měřicího systému i prostředí, ve kterém by měření bylo prováděno. Pro dostatečný odstup signálu od šumu je vhodné vytvořit měřicí impulz o dostatečném akustickém tlaku. Na tento fakt musí být nahlíženo při výběru mikrofonů, reproduktorů a výkonových zesilovačů. Při výběru mikrofonů pak musí být brán ohled na frekvenční charakteristiku, směrovou charakteristiku a maximální akustický tlak, který je mikrofon schopen snímat. Dále se vyžaduje i vysoká stálost parametrů vzhledem k vlivům stárnutí a to pro zajištění opakovatelnosti měření. V neposlední řadě je podstatná také cena, jelikož se v měřicím systému nachází celkem 47 mikrofonů. Výkonový zesilovač by pak měl disponovat dostatečným výkonem, minimálním zkreslením a odstupem signálu od šumu. Reproduktor by poté měl být schopen pracovat s dostatečným výkonem v celém frekvenčním pásmu. Rovněž i u něj by měla být frekvenční charakteristika lineární pokud možno s co nejnižší tolerancí. Těchto reproduktorů je v systému použito celkem 5.

Výsledné požadavky na celý systém vychází z [4] a jsou tedy následující:

- Měřicí mikrofon
 - Frekvenční rozsah: 100 Hz – 10 kHz ± 1 dB
 - Mezní hladina akustického tlaku: ≥ 120 dB
 - Kulová frekvenční charakteristika ve vodorovné rovině v celém frekvenčním pásmu
 - Mechanická odolnost
 - Nízká cena (47 kusů)

- Zdroj akustického výkonu
 - Frekvenční rozsah: 100 Hz – 10 kHz ± 3 dB
 - Maximální akustický tlak: ≥ 115 dB_{SPL}
 - Nízká hmotnost a velikost
 - Nízká cena (5 kusů)

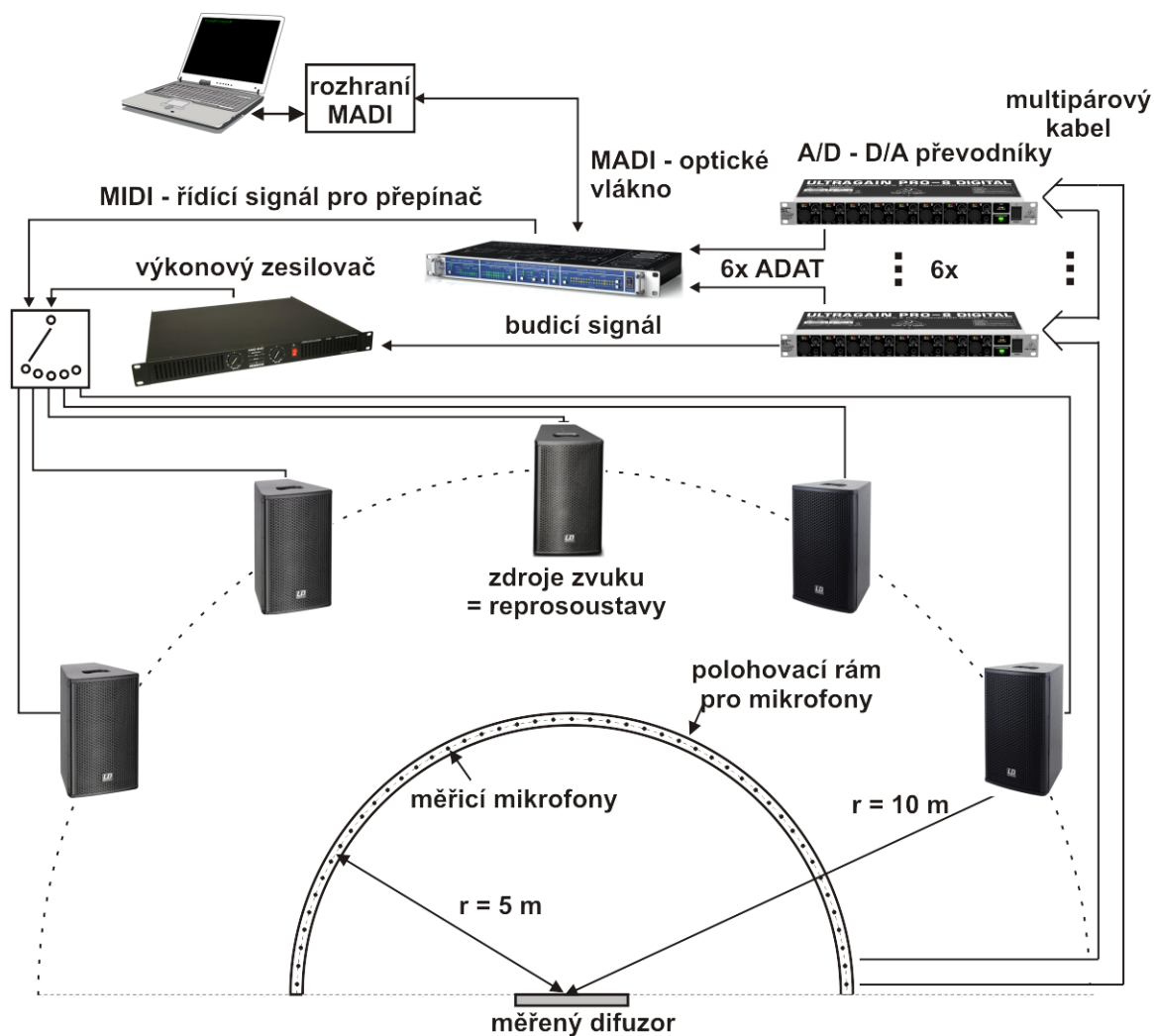
- Výkonový zesilovač
 - Odstup signálu od šumu: ≥ 100 dB
 - Výkon: dle citlivosti reproduktoru pro akustický tlak ≥ 110 dB_{SPL}
 - Přijatelné rozměry a hmotnost

- AD převodník
 - Dynamická hloubka: ≥ 100 dB
 - Odstup signálu od šumu: ≥ 90 dB
 - 8 kanálů pro 1U zařízení
 - Nízká cena (6 kusů v modulu)

2.2 Volba komponent systému pro měření difuzity

Zařízení je realizováno z následujících komponent. Jako zdroj akustického výkonu byly vybrány celopásmové reprosoustavy značky LD Systems, model LDEB 82 Stinger 8. Snímání zvuku zajišťují precizní klopové všesměrové mikrofony značky SHURE, model MX 150 B/O. Nejedná se o měřicí mikrofon, ale v tomto případě jsou parametry (frekvenční a směrová charakteristika) pro měření tohoto typu maximálně dostačující. K této volbě bylo přihlédnuto vzhledem k ceně a celkovému množství kusů mikrofonů potřebných pro realizaci zařízení. Pro zesílení signálu a převedení do digitální podoby byly vybrány AD převodníky s ADAT výstupem značky Behringer, model ADA8000 s 24-bitovými integrovanými obvody Cirrus Logic. Tyto převodníky jsou ideálním kompromisem vzhledem k ceně a dosaženým parametrům, které jsou více než příznivé. Pro funkčnost měření nejsou některé jejich nedostatky podstatné, pro přesnost měření však ano. To vede k dílčím úpravám těchto převodníků. Vzhledem k rozsahu nutných úprav se však stále vyplatí tyto úpravy provést.

Dále se v měřicím systému nachází ADAT/MADI konvertor značky RME, model ADI-648. Tento přístroj představuje generátor world clock signálu, příjem dat přes optické ADAT spoje z převodníků, jejich transport optickým vláknem do řídicího počítače a řízení spínání reproboxů LD Systems pomocí MIDI protokolu. Pro připojení k počítači je využito rozhraní HDSPe MADIface od firmy RME. To je schopné do notebooku připojit až 64 kanálů digitálního audiosignálu o vzorkovací frekvenci 48 kHz. Dále je pro přepínání reproboxů sestaven přepínací systém, který reaguje na MIDI protokol, odesílaný z měřicího počítače. O buzení reproboxů se stará zesilovač firmy Akiyama, model AMD 400 s výkonem 2x150 W do zatěžovací impedance 8 Ω . Princip měření je uveden na obrázku 2.2. Fotografie rackového boxu s měřicí sestavou je na obrázku 2.3. Celý měřicí systém je vyobrazen na obrázku 2.4.



Obr. 2.2: Zobrazení celého měřicího systému pro měření difuzity

AD převodníky Behringer je tedy vhodné vylepšit. Jejich silná stránka jsou použité integrované obvody datových převodníků Cirrus Logic CS4270, které mají dobré vlastnosti a pro měření tohoto typu jsou plně dostačující. Celková konstrukce je jinak vyhovující. Mikrofonní předzesilovače mají však svá omezení. Z měření uvedených dále vyplývá, že některé vlastnosti jsou pro běžné použití (např. domácí studio) zcela dostačující, avšak pro měřicí účely je vhodné dosáhnout lepších parametrů.



Obr. 2.3: Fotografie rackového boxu obsahující elektroniku pro měření difuzity



Obr. 2.4: Fotografie kompletního měřicího systému realizovaného na FEL

3

Behringer ADA8000, požadavky na úpravu

3.1 Vlastnosti převodníku

Převodník Behringer ADA8000 je osmikanálový AD/DA převodník s rozlišením 24 bitů. Vzorkovací kmitočet může být nastaven na 44,1 nebo 48 kHz pro osmikanálový režim. V takovém stavu může být převodník vzhledem k řídicímu kmitočtu world clock ve stavu master – generuje synchronizační signál, který je přítomen na výstupním konektoru a sám je tímto signálem řízen. Nebo lze přepnout do stavu slave, kdy je převodník řízen externě a to dvěma způsoby. Buďto je toto řízení realizováno signálem world clock, nebo je synchronizace řešena příchozím datovým tokem ve formátu ADAT pomocí TOSLINK rozhraní. V měřicím modulu, který je realizován na Fakultě elektrotechnické, je synchronizační signál generován konvertorem RME, všechny převodníky jsou tedy řízené externím world clock signálem. Tím i odpadá problém s jitterem, jelikož stabilita world clock signálu u výrobků RME je výborná.



Obr. 3.1: Osmikanálový AD převodník Behringer, model ADA8000

Parametry zařízení jsou uvedeny v následující tabulce. Vzhledem k tomu, že mnoho důležitých parametrů v katalogovém listu chybí, bylo nutné je změřit. Bylo také nutné celé vstupní zapojení analyzovat a zjistit, kde by mohly být zdroje případných problémů.

Parametr		Hodnota	Jednotka
Rozsah zisku	Mikrofonní vstup	+10 až +60	dB
	Linkový vstup	-10 až +40	dB
Maximální vstupní úroveň	Mikrofonní vstup	+6	dBu
	Linkový vstup	+26	dBu
Vstupní impedance	Mikrofonní vstup	2	k Ω
	Linkový vstup	20	k Ω
Fantomové napájení (spínatelné)		+48	V

Parametr	Hodnota
Frekvenční rozsah	10 Hz – 21 kHz @ 48 kHz f_s
Celkové harmonické zkreslení	<0,01 %
Útlum přeslechu	>86 dB
Dynamický rozsah AD převodníku	cca 103 dB
Typ použitého AD převodníku	sigma-delta
Bitová hloubka AD převodníku	24 bitů
Převzorkování AD převodníku	64 x

Tab. 3.1: Katalogové údaje převodníku ADA8000

Každý kanál převodníku má mikrofonní a linkový vstup. Tyto vstupy se liší tím, že linkový vstup je vybaven napěťovým děličem, aby nedošlo k přebuzení mikrofonního předzesilovače, na jehož vstupy je následně signál připojen. Každý kanál má pomocí potenciometru nastavitelný rozsah zisku v rozmezí 50 dB. Maximální vstupní úroveň je pak +6 dBu pro mikrofonní vstup při nejnižším zesílení předzesilovače +10 dB a plné buzení 0 dBFS integrovaného obvodu AD převodníku. Linkový vstup s děličem o útlumu 20 dB pak poskytuje možnost vstupního signálu až +26 dBu. Tyto parametry patří mezi obvyklé, ne však zcela ideální. Pro plné vybuzení převodníku je totiž nutné i při minimálním zesílení 10 dB přivést na vstup pouze +6 dBu, což udává vnitřní úroveň signálu 16 dBu. Při dané konstrukci (viz další kapitola) je však možné dosáhnout vnitřní úroveň přes 20 dBu pro výsledné plné vybuzení převodníku. Taková úprava může ovlivnit odstup signálu od šumu, protože poskytuje vyšší dynamický rozsah.

Zkreslení na straně AD konverze je výrobcem udáváno pouze jako hodnota THD (v katalogu < 0,01 %) a dynamický rozsah by měl být 103 dB. Nelze však zjistit, při jaké konfiguraci a jakým způsobem bylo měření provedeno. Proto byly některé parametry změřeny na analyzátoru Audio Precision AP 582.

3.2 Naměřené parametry

Dynamický rozsah byl měřen v prvním případě pro zesílení 13 dB(Fs/Vrms), konkrétně velikost napětí na vstupu byla -14 dBu a vybuzení převodníku -3 dBFs. Zesílení předzesilovače bylo nastaveno na 30 dB. To znamená, že na výstupu analogové části převodníku byla přítomna signálová hladina 16 dBu. Rezerva -3 dBFs byla zvolena z důvodu, aby nedošlo k přebuzení analogové části AD převodníku. Pro testování byl zvolen harmonický signál o kmitočtu 1 kHz. V druhém případě se lišila pouze hodnota zesílení, která byla nastavena na maximálních 60 dB, a úroveň napětí na vstupu, která byla úměrně zesílení nastavena na -44 dBu. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Parametr	Hodnota
Dynamický rozsah @ 30 dB zesílení	83 dB
Dynamický rozsah @ 60 dB zesílení	77,5 dB
Absolutní hodnota šumového napětí @ 60 dB	-80,5 dBu

Tab. 3.2: Naměřené hodnoty dynamického rozsahu převodníku pro buzení -3 dBFs pro původní řešení.

Z naměřených hodnot je patrné, že při daném zesílení není možné dosáhnout dynamického rozsahu 103 dB z důvodu šumu předzesilovače. Při započtení zesílení 30 dB se výsledný odstup signálu od šumu blíží hodnotě 115 dB. Profesionální předzesilovače mají při těchto hodnotách zesílení odstup signálu od přes 120 dB. Z hodnoty šumu v jednotkách dBFs lze vypočítat, jaká je ekvivalentní hodnota šumu na vstupu předzesilovače, a to následujícím postupem. Při napájecím napětí 5 V je maximální napětí na vstupu (tedy 0 dBFs) rovna 5 V špička-špička. To znamená, že maximální efektivní vstupní napětí je:

$$V_{INMAX} = \frac{5}{2\sqrt{2}} = 1,768 V_{RMS} \quad (3.1)$$

Po převedení na jednotku dBu toto napětí odpovídá 7,16 dBu. Pro zjednodušení výpočtu tuto hodnotu zaokrouhlíme na 7 dBu. Tato hodnota je ekvivalentní 0 dBFs. Nyní můžeme vypočítat šumové napětí v dBu na vstupu převodníku.

$$V_{inAD} = -80 \text{ dBFs} + 7 \text{ dBu} = -73 \text{ dBu} \quad (3.2)$$

Před AD převodníkem se nachází dělič napětí, který je buzen rozdílovým zesilovačem. Rozdílový zesilovač je však součástí mikrofonního zesilovače, proto jej zatím nebudeme do výpočtu zahrnovat. Dělič je setaven z odporů o hodnotách $2,2\text{ k}\Omega$ a $348\ \Omega$ a má útlum $17,3\text{ dB}$. Pro zjednodušení výpočtu zaokrouhlíme tuto hodnotu na 17 dB . Hodnota šumu před tímto děličem se vypočte snadno přičtením těchto 17 dB , tedy:

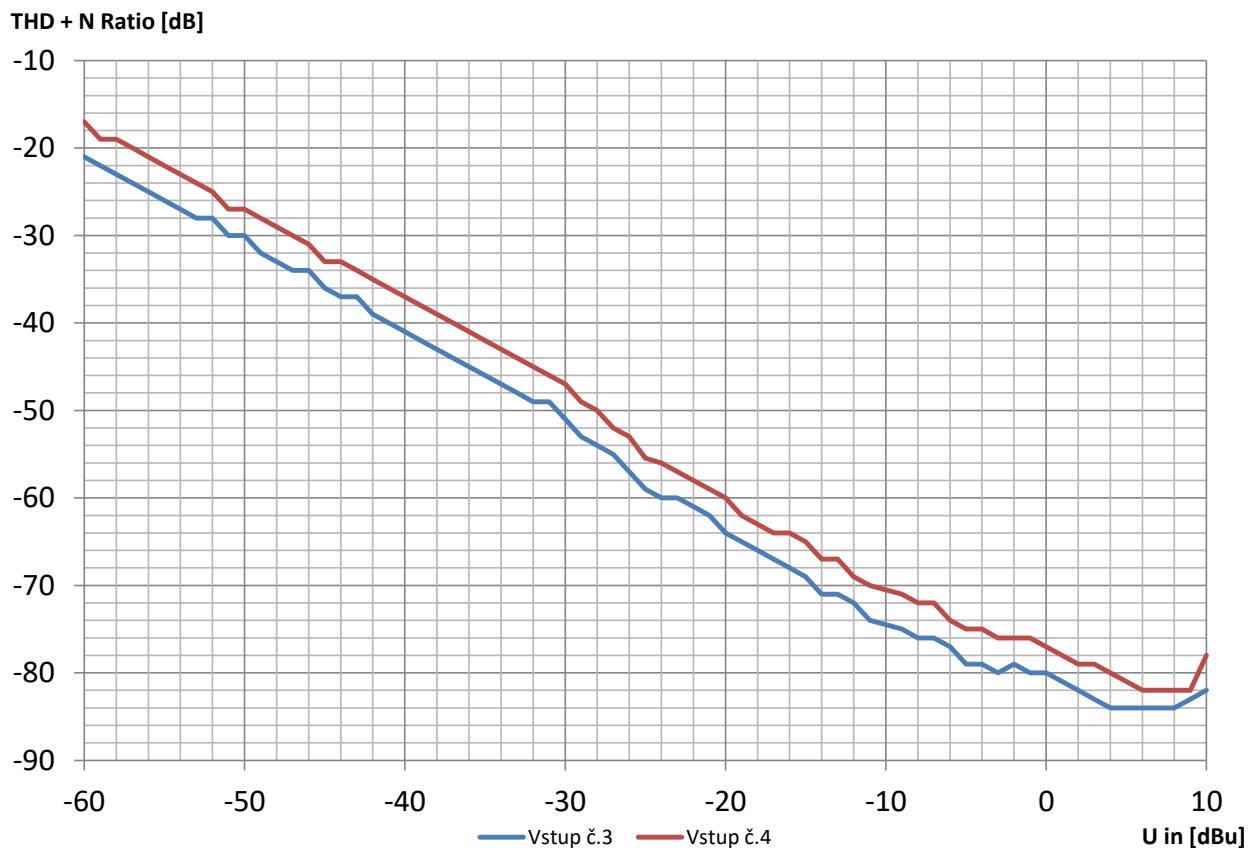
$$V_{\text{ein}AT T} = -73\text{ dBu} + 17\text{ dB} = -56\text{ dBu} \quad (3.3)$$

Nyní můžeme spočítat ekvivalentní hodnotu šumu na vstupu. Maximální zesílení zesilovače, který se nachází před děličem (včetně rozdílového zesilovače) je 60 dB . Výsledná ekvivalentní hodnota šumu na vstupu je tedy tato:

$$V_{\text{ein}IN PUT} = -56\text{ dBu} - 60\text{ dB} = \underline{-116\text{ dBu}} \quad (3.4)$$

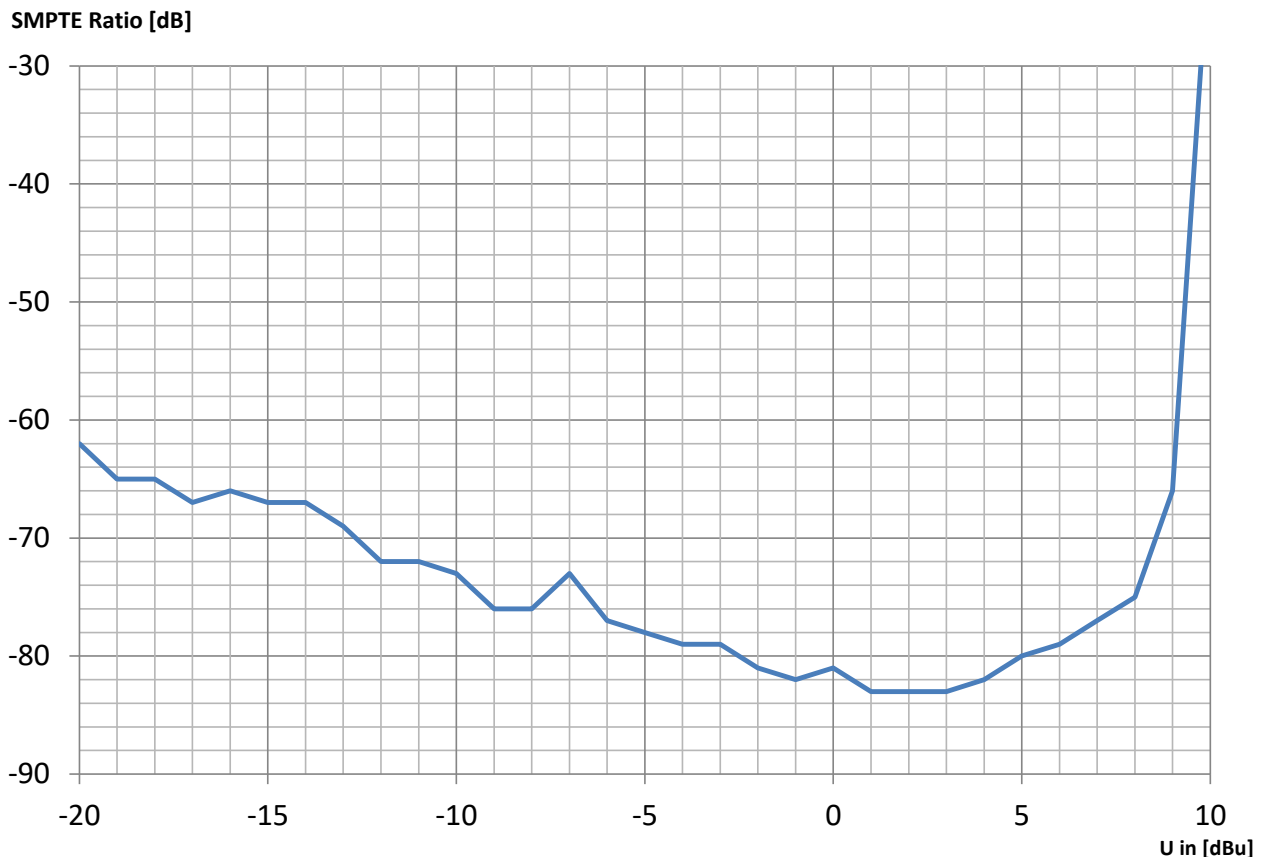
Tímto výpočtem je dokázán velký nedostatek předzesilovače, jelikož moderní konstrukce mají při těchto hodnotách zisku ekvivalentní vstupní šum blízký se -130 dBu . Jinými slovy, jejich šumové číslo bývá přibližně 1 dB , což při dosazení $150\ \Omega$ impedance referenčního mikrofónu zvýší Johnsonův šum z úrovně cca -130 dB pouze o 1 dB . Integrovaný zesilovač THAT1512 se právě těmito parametry blíží. Vůči stávajícímu řešení je to rozdíl více než 10 dB , což je zcela zásadní. Další šum je přidán dalšími sériovými rezistory, jako například napěťovým děličem, avšak použité hodnoty těchto součástek jsou vzhledem k vysokým napěťovým hladinám zanedbatelné. Napěťový dělič podstatou své funkce tlumí signál a to včetně šumu, tím je celkový přidaný šum snižen. Stejný výpočet je možné aplikovat na ostatní naměřené hodnoty dynamického rozsahu.

Následující graf zobrazuje závislost THD + N Ratio, nebo-li odstup signálu od šumu a harmonického zkreslení. Z grafu je patrné, že samotné harmonické zkreslení se projevuje jen oblastech blízkých se limitaci předzesilovače. I v takovém případě by však zkreslení nemělo dosahovat takových hodnot, jelikož při minimálním zisku (10 dB) by při napájecím napětí $\pm 15\text{ V}$ měly být operační zesilovače schopny zpracovávat hodnotu nad 20 dBu bez zkreslení. Při maximální vstupní úrovni 10 dBu je již zkreslení patrné. Tento výsledek však vede k zápisu $\text{THD} < 0,01\%$, jelikož právě tato hodnota odpovídá odstupům 80 dB . Při vyšších zesíleních je průběh THD + N posunut o šum přidaný předzesilovačem, tvar průběhu je však velmi podobný. Není tedy třeba uvádět závislost na zisku.



Obr. 3.2: Odstup signálu od šumu a harmonického zkreslení při zisku 10 dB v závislosti na vstupním napětí

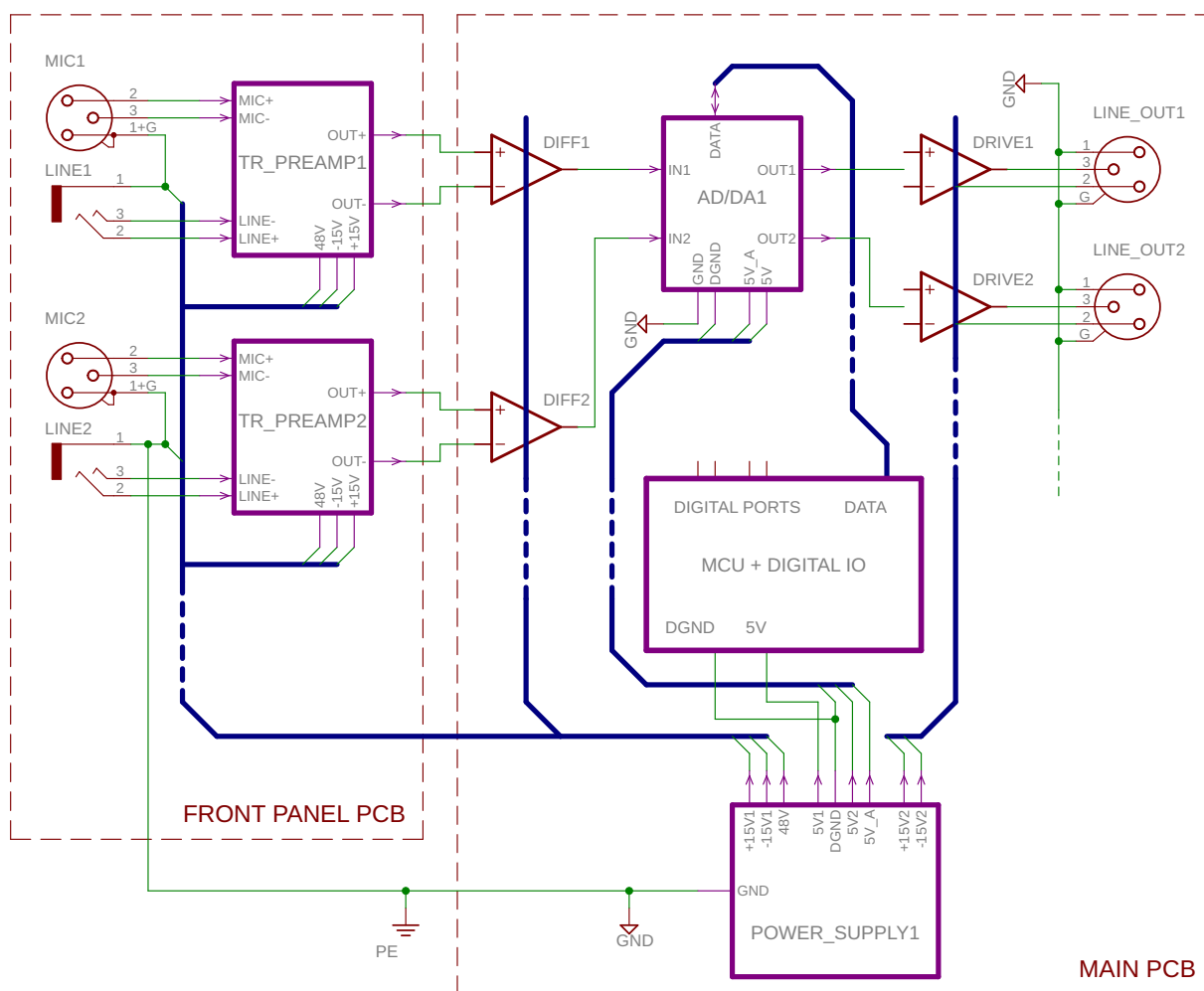
Problém může představovat intermodulační zkreslení. Při něm je totiž měřeno dvěma sinusovými průběhy. Měření intermodulačního zkreslení ukazuje součtové a rozdílové produkty, které mají daleko vyšší výpovědní hodnotu o reálném chování systému.



Obr. 3.3: Odstup intermodulačního zkreslení dle SMPTE (Dva sinusové průběhy o frekvencích 60 Hz a 7 kHz s poměrem amplitud 4:1) při nastaveném zisku 10 dB v závislosti na vstupním napětí

Měření intermodulačního zkreslení bylo provedeno dle normy SMPTE pro dva harmonické signály o kmitočtech 60 Hz a 7 kHz v poměru 4:1. Ze závislosti intermodulačního zkreslení na vstupní úrovni, která je uvedena na obrázku 3.3, je patrné, že produkty intermodulačního zkreslení s rostoucí vstupní úrovní klesají. Vzhledem k hodnotám, které byly naměřeny, se jedná u nižších vstupních úrovní o produkty obsažené v šumu. V oblasti 0 dBu vstupní úrovně se však poměr stává konstantním až klesajícím, tedy hodnota intermodulačních produktů roste. Na konci grafu lze pozorovat prudký nárůst způsobený limitací některé z částí signálového řetězce. Měření bylo provedeno na třetím kanálu převodníku.

Pro možnost upravit vstupní zesilovače je nutné znát celkový princip převodníku, jednotlivé funkční bloky a jejich zapojení. Na obrázku 3.4 je zobrazeno blokové schéma. Zařízení má kvalitně navržený zdroj, kde napájecí napětí analogové větve zajišťují integrované stabilizátory LM7815 a LM7915. Pro vstupní a výstupní část jsou samostatné integrované obvody, takže je snížen vliv přenosu rušení přes napájecí větve. Pro digitální obvody je rovněž použito více zdrojů, pro AD převodníky pak jeden samostatný stabilizátor 7805. Fantomové napájení je realizováno pomocí nastavitelného regulátoru LM317, jehož výstupní zvlnění je v daném zapojení velmi nízké.



Obr. 3.4: Blokové schéma převodníku Behringer ADA8000

3.3 Požadované parametry

Z naměřených hodnot je patrné, že předzesilovač vykazuje zvýšené harmonické i intermodulační zkreslení při vyšších napěťových úrovních, ale i při vyšších nastaveních zisku. Rovněž je příliš vysoká hodnota šumu jak při nízkých, tak i vysokých nastaveních zisku. Další nevýhodou je omezení frekvenčního rozsahu z hlediska nízkých frekvencí při vysokém nastavení zisku. Mezní kmitočet pro použitý oddělovací kondenzátor o hodnotě $1000\mu\text{F}$ a rezistor $4,7\Omega$ vychází 33 Hz. Všechny měřené parametry se mezi kanály lišily až o 6 dB. Během měření difuzity byl navíc zjištěn problém nestability zisku jednotlivých zesilovačů, který byl zřejmě způsoben teplotní nestabilitou součástek.

Samotný čip AD převodníku Cirrus Logic CS4270 má následující vlastnosti. Bitová hloubka 24 bitů, THD + N = -95 dB a dynamická hloubka 105 dB. Odstup THD + N je navíc možné ještě zvýšit nižší výstupní impedancí zdroje signálu na vstupu AD převodníku až k 105 dB. Z těchto údajů vyplývá, že na výsledném zkreslení se podílí především mikrofonní předzesilovač. Proto po jeho úpravě můžeme očekávat vylepšení parametrů celého převodníku. Aby se na výsledném zkreslení a šumu předzesilovač nepodílel, musí mít zkreslení pod 0,01 % i při maximálním zisku 60 dB a ekvivalentní vstupní šum blízký se -130 dBu při plném zisku. Pro minimální zisk by však měl mít předzesilovač ekvivalentní vstupní šum pod -100 dBu. Taková kritéria může splnit integrovaný obvod THAT1512, který má vůči původnímu řešení mnoho výhod, jako jsou například přebuditelnost, odolnost vůči souhlasným signálům, odstup signálu od šumu, teplotní stabilita zisku a další parametry. Výsledný souhrn požadovaných parametrů je uveden v následující tabulce:

Parametr	Hodnota
Dynamický rozsah při maximálním zisku	≥ 90 dB
Dynamický rozsah při minimálním zisku	≥ 100 dB
Odstup harmonického zkreslení	≥ 80 dB
Odstup intermodulačního zkreslení	≥ 80 dB
Frekvenční rozsah při plném zisku	20 Hz až 20 kHz $\pm 0,5$ dB
Tepelná a časová stabilita zisku	–
Shoda parametrů mezi jednotlivými kanály	± 1 dB

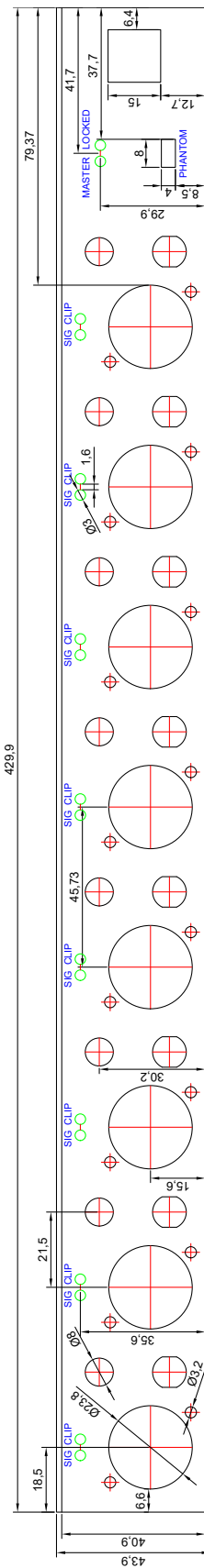
Tab. 3.3: Tabulka požadovaných parametrů pro mikrofonní předzesilovač

4

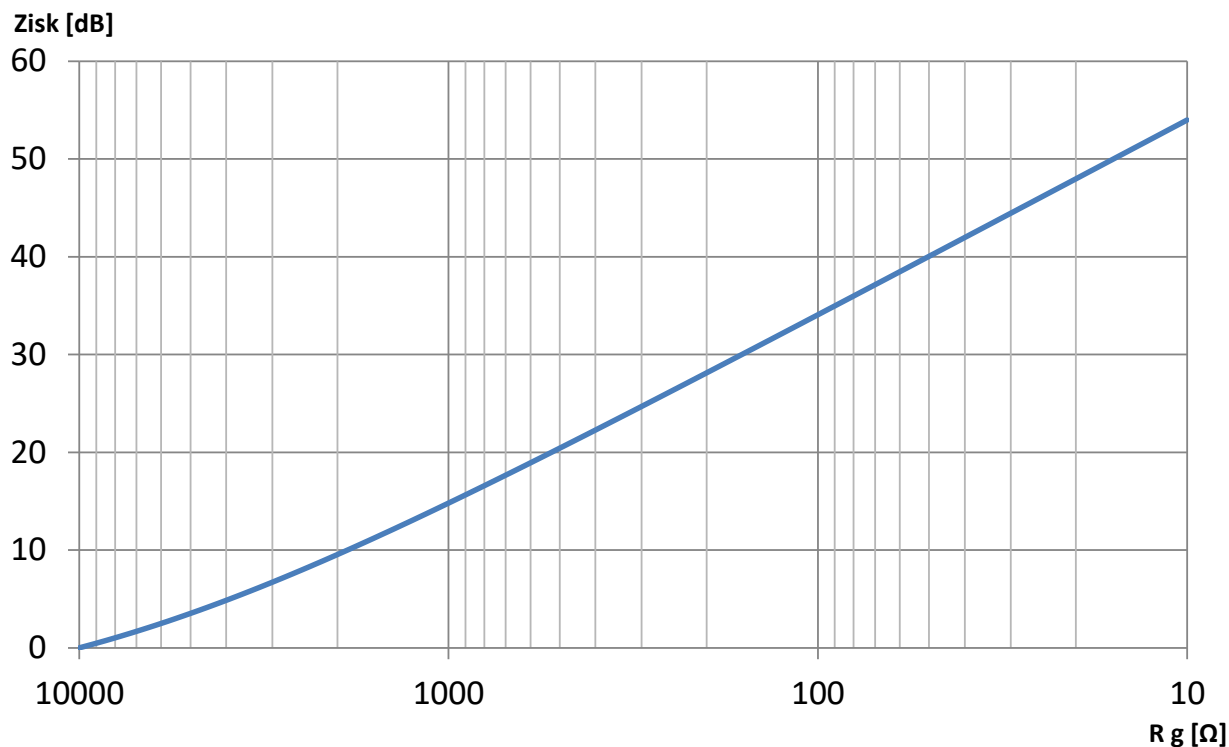
Návrh mikrofonního předzesilovače pro ADA8000

4.1 Mechanická koncepce

Jako nejvíce vyhovující byla vybrána shodná koncepce DPS předzesilovačů s původní koncepcí – tedy DPS vsunutá do hliníkového profilu a uchycená pomocí konektorů. Vstupní konektory jsou v původním řešení samostatné pro mikrofonní a linkovou úroveň. Konektor pro vstup mikrofonu je typu XLR a linkový typu JACK. Toto řešení zabírá příliš prostoru a vzhledem k níže popsanému obvodovému řešení předzesilovače bylo nutné použít konektor kombinovaný typu I od firmy Neutrik. Tento konektor má shodné rozměry s XLR konektorem původního řešení jako jsou průměr pro montáž, otvory pro uchycení a celková délka, takže po mechanické stránce nepředstavuje tato změna žádnou komplikaci. Potenciometr pro regulaci zisku bude použit původní a to z mnoha důvodů, jedním z nich je například velmi malé množství anti-logaritmických potenciometrů na trhu. Vhodnost antilogaritmického průběhu dráhy potenciometru je totiž dána změnou v zisku v závislosti na hodnotě odporu, kterým je zesílení nastaveno. Tato závislost je zobrazena na obrázku 4.2. LED diody pro indikaci přítomnosti signálu a přebuzení budou použity rovněž původní. Tím je splněn požadavek, aby do mechanické konstrukce nebylo nijak zasahováno a nevznikaly tak komplikace při realizaci. Pro správný návrh DPS, která bude mít shodné umístění komponent zasahujících do otvorů v hliníkovém profilu, bylo zapotřebí vytvořit výkres modelu, který by mohl být do návrhového systému DPS importován. Na následujícím obrázku je zobrazen výkres ze softwaru DraftSight 2018.



Obr. 4.1: Výkres čelního hliníkového panelu ADA8000



Obr. 4.2: Závislost zesílení integrovaného obvodu THAT1512 na hodnotě rezistoru R_g

4.2 Volba použitých součástek

4.2.1 Integrovaný mikrofonní předzesilovač THAT1512

Jako aktivní prvek předzesilovače je použit pouze integrovaný obvod THAT1512. Jeho vnitřní zapojení vychází z klasických profesionálních předzesilovačů v komplementárním zapojení. Avšak krom výhod, jako jsou teplotní stálost, díky integraci v jedné součástce je tento obvod vylepšen řadou zapojení a proudových zpětných vazeb, které umožňují dosáhnout parametrů, které několikanásobně běžná profesionální zapojení převyšují. Těmito parametry jsou z těch nejdůležitějších odstup signálu od šumu, zkreslení harmonické i intermodulační, odolnost proti souhlasnému signálu, proti zvlnění napájecího napětí a v neposlední řadě také maximální vstupní napěťová úroveň, která umožňuje tento obvod použít právě v kombinovaných vstupních jednotkách s mikrofonními a linkovými vstupy. Tyto parametry zvyšují celkový použitelný dynamický rozsah a za předpokladu správného návrhu zařízení lze dosáhnout snadněji lepších parametrů.

4.2.2 Rezistory

Obvod THAT1512 je jádrem celého zapojení mikrofonního předzesilovače, proto byl uveden jako první. Avšak pro správný návrh je více než nutné správně volit pasivní součástky. V případě rezistorů, které jsou zapojeny v sérii se signálovou cestou, by tyto rezistory měly být tenkovrstvé s nízkým tepelným koeficientem. Rezistory, které např. definují impedanci proti zemnímu spoji, mohou být i tlustovrstvé, za předpokladu, že aktivní prvky nevykazují vysoký proudový šum na svých vstupech. V každém případě je však nutné se vyhnout rezistorům uhlíkovým. V případě této práce byly zvoleny rezistory typu SMD s velikostí, která se odvíjí od výkonu, který má daný rezistor měnit v teplo. V případě, kdy není rezistor tepelně namáhán, byla volena velikost nižší, než 1206 a to s ohledem na prostor, který by v daném místě součástka zabrala. Hodnoty součástek by měly být voleny co možná nejnižší a to platí především pro rezistory v sérii se signálovou cestou. Na tento fakt poukazuje obecně známý vztah pro Johnsonův šum 4.1. K tomuto vzorci se nejvíce blíží reálnými hodnotami právě tenkovrstvé kovové rezistory. Velmi podrobně se výběrem pasivních (ale i aktivních komponent) zabývá [1].

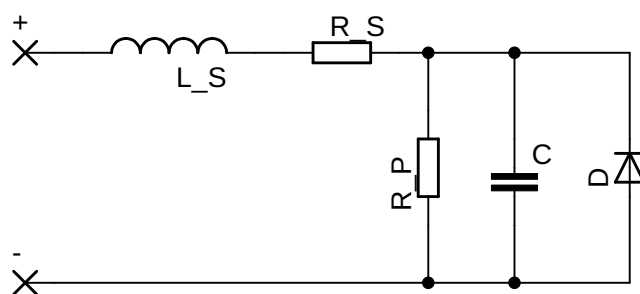
$$V_{noise} = \sqrt{4k_BTR} [V] \quad (4.1)$$

4.2.3 Kondenzátory

Výběr velikostí keramických kondenzátorů je volena opět z hlediska prostorvé náročnosti v daném místě. Tyto kondenzátory jsou zde použity pro blokování napájecích větví, potažmo pro ochranu proti vysokofrekvenčnímu rušení na vstupech předzesilovače. Veškeré kondenzátory nastavující časovou konstantu filtrů, která jsou zapojeny v signálové cestě, by měly být výhradně fóliové, s dielektrikem voleným dle povahy zapojení a cenového kompromisu. V případě stejnosměrného serva je vhodné zvolit fóliový kondenzátor především z důvodů velmi malých svodových proudů, které jsou směrodatné pro správnou funkci stejnosměrného serva.

Elektrolytické kondenzátory, použité jako vazební prvky, bývají ve většině komerčních zapojení vzhledem k požadavkům na cenu použity, ale chybně. Tato součástka pro správnou funkci vyžaduje polarizaci. Elektrolytické vazební kondenzátory vyžadují obvykle mnohonásobně vyšší kapacity pro stejnosměrné oddělení (v běžném zapojení) a to především z důvodu napěťových úbytků, které se na této součástce objevují a nikdy nejsou

nulové. V případě, kdy je totiž tento kondenzátor polarizován např. pouze stejnosměrným offsetem v zapojení (řádově jednotky až desítky mV) může dojít při vysokých hladinách signálu k napěťovému úbytku, který zapříčiní nulovou až zápornou polarizaci. Toto je fakt, který vede ke zkreslení. Tento jev je patrný z náhradního zapojení elektrolytického kondenzátoru udávaného výrobcí takových kondenzátorů. Náhradní schéma je uvedeno na obrázku 4.3, kde si můžeme všimnout vlastní kapacity kondenzátoru C a několika parazitních prvků. Těmito prvky jsou sériová indukčnost (L_S), daná tvarem a délkou hliníkové fólie a přívodů, sériový odpor (R_S) daný odporem přívodních vodičů a vnitřní části kondenzátoru, paralelním odporem (R_P) představujícím svodový proud a také zenerovou diodou (D), která zde prezentuje dva vlivy. Tím prvním je polarizace dielektrika a tím druhým je napěťové dimenzování kondenzátoru.



Obr. 4.3: Náhradní zapojení elektrolytického kondenzátoru

V profesionálních konzolách značky SSL je využit princip, kdy jsou dva elektrolytické kondenzátory o dvojnásobné kapacitě (místo pouze jednoho vazebního prvku) zapojené v sérii s trvalou polarizací několika jednotek až desítek volt. V takovém případě musí být kondenzátory dostatečně napěťově dimenzované. To vede obecně k jejich lepším vlastnostem, jako jsou svodové proudy, ekvivalentní sériový odpor a podobné. Vysoká kapacita a napěťové dimenzování má však za následek mnohonásobně větší velikost kondenzátorů. To je nevýhoda tohoto systému oddělování jednotlivých bloků pro signálové zpracování. Při použití fóliových kondenzátorů není třeba řešit polaritu, avšak design, založený na použití nízkých impedancí z šumových důvodů, v takovém případě znemožňuje použití těchto prvků z důvodu jejich velmi vysoké ceny, ale i fyzické velikosti, která je mnohonásobně vyšší, než při využití předchozího způsobu vazby. Tyto

dva faktory i přes robustnost a jednoduchost použití jednoho vazebního prvku převyšuje nutnost optimálního prostorového řešení.

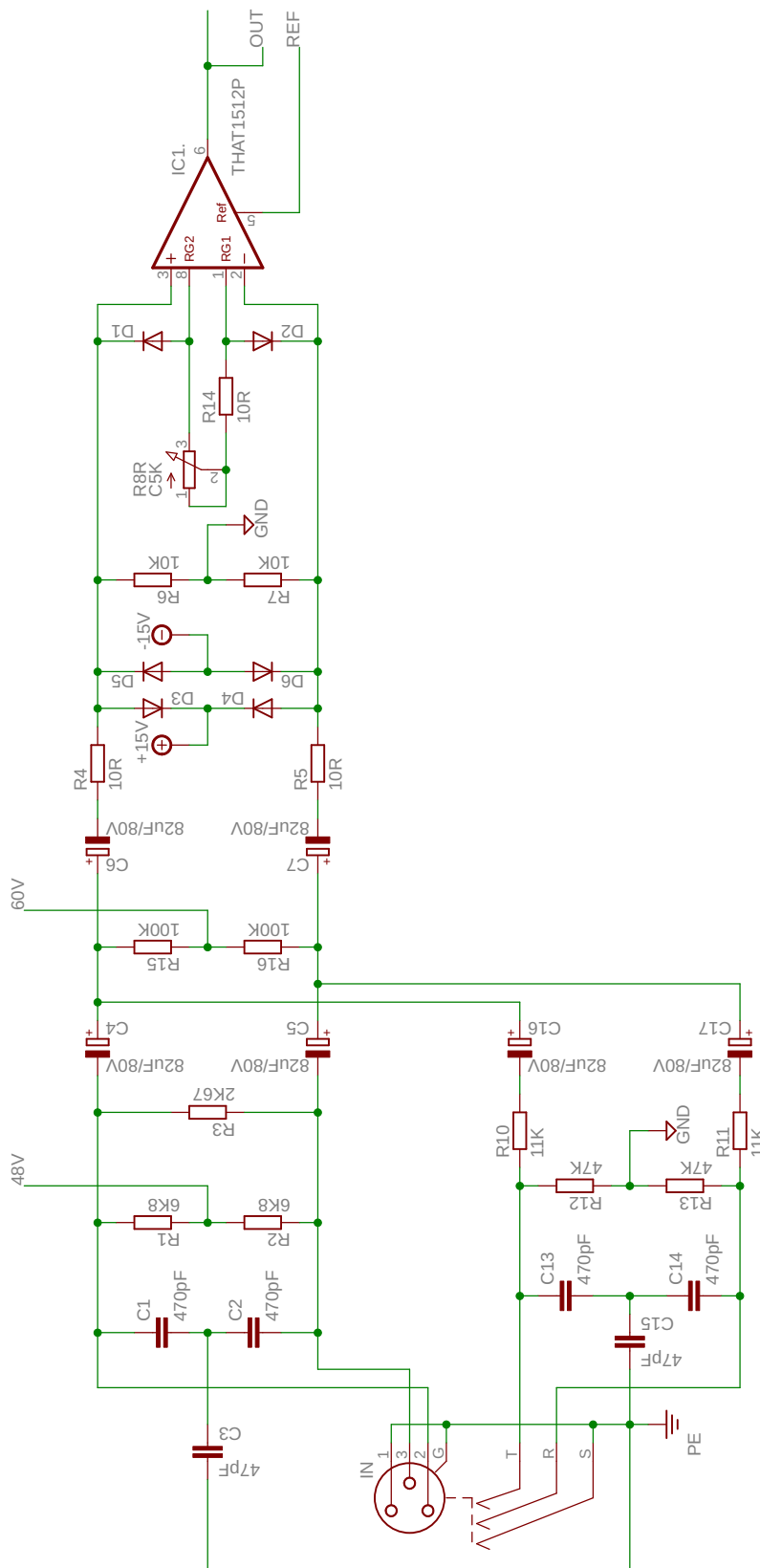
4.2.4 Ostatní aktivní komponenty

Z dalších aktivních komponent je zde využít pouze operační zesilovač OP07 a to jako stejnosměrné servo nastavující referenční napětí pro integrovaný mikrofonní předzesilovač. Volba tohoto obvodu pramení z poměru ceny a výkonu, jelikož v tomto případě je zásadní především vstupní napěťový offset a vstupní klidové proudy. Hodnota klidových proudů dle katalogových listů je však v řádu jednotek nA, což je pro návrh přijatelná hodnota. Cena tohoto obvodu se značně liší dle specifikovaného maximálního vstupního offsetu, avšak i ta nejlevnější varianta tohoto obvodu dosahuje uspokojivého výsledku v řádech desítek μV . Výrazně lepších parametrů totiž dosahují až mnohonásobně dražší verze tohoto zesilovače, či jiné typy. Z hlediska aktuálního použití se jedná pouze o omezení výstupního stejnosměrného napětí integrovaného mikrofonního předzesilovače na nezbytné minimum, aby nebylo nutné použít vazební člen mezi výstupem THAT1512 a bufferem umístěným na hlavní DPS před AD převodníkem. Dalším důvodem pro jeho použití je zamezení limitace mikrofonního předzesilovače způsobená výrazným stejnosměrným posunem výstupu při vysokých hodnotách nastaveného zisku a jeho změnách.

4.3 Návrh modulu zesilovače

Na signálové piny vstupního konektoru jsou připojeny keramické kondenzátory C1 – C3 a C13 – C15. Ty plní úlohu ochrany vstupní části předzesilovače proti vysokofrekvenčním vlivům. Signál, který skrze ně prochází je sveden na šasi přístroje a odtud dále do ochranného vodiče přes napájecí síťový konektor. Dále jsou paralelně k oběma signálovým vodičům přivedeny rezistory R1 a R2, které slouží pro přívod fantomového napájení ze společné napájecí větve pro všech 8 předzesilovačů. Dále je mezi signálové větve zapojen rezistor R3, který nastavuje vstupní impedanci celého zesilovače spolu s ostatními rezistory na hodnotu $2\text{ k}\Omega$ diferenciálně.

Následuje zapojení se stejnosměrným oddělením vstupu mikrofonního zesilovače. To je tvořeno elektrolytickými kondenzátory C4 – C7 a rezistory R15 a R16. Polarizační napětí je zvoleno na 60 V, což znamená trvalou polarizaci minimálně 10 V (vůči fantomovému napájení o hodnotě 48 V). Za touto sekcí následují vyvažovací odpory R4 a R5, které kompenzují nesejnorodost impedancí přívodních vodičů a přechodových odporů. Hodnota je volena co nejnižší z hlediska šumu a co nejvyšší z hlediska poměru přechodových a jiných odporů, které mohou být v zapojení přítomny. Zároveň tyto rezistory plní funkci proudového omezení při přechodových dějích během přepínání fantomového napájení. Tolerance hodnot by pro zachování odolnosti vůči souhlasným signálům měla být co možná nejnižší ($\pm 0,1\%$).



Obr. 4.4: Schéma zapojení mikrofonního předzesilovače THAT1512

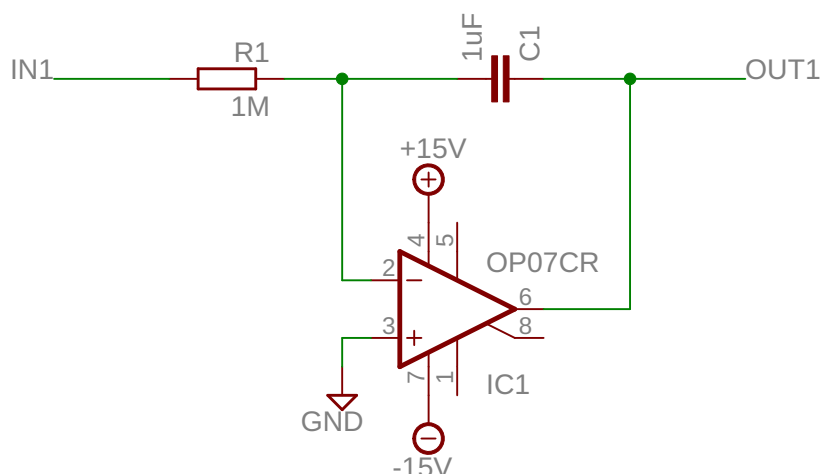
Rezistory R6 a R7 plní úlohu svedení vstupních klidových proudů do zemního spoje a určení potenciálu přímo na vstupech mikrofonního zesilovače v klidovém stavu. Hodnota těchto rezistorů je volena co nejnižší vzhledem k proudovým šumům a stejnosměrným klidovým proudům, které mohou způsobit zvýšení napěťového offsetu zapojení. Také je při volbě hodnoty kladen důraz nejen na zachování vstupní impedance, ale a optimální hodnotu RC konstanty vazebních prvků. Z tohoto hlediska by bylo výhodné, aby hodnota byla co nejvyšší, aby vazební prvky nebyly tak rozměrné. Je zvolena hodnota $10\text{ k}\Omega$, která je z hlediska integrovaného obvodu THAT1512 optimální. Zároveň tato hodnota vede k volbě kapacity vazebních prvků C4 – C7 na $82\ \mu\text{F}$. Zapojení má při této volbě kapacity mezní frekvenci cca $0,4\text{ Hz}$, což je pro přenos celého spektra vzhledem k fázovému zkreslení vhodná hodnota. Rezistory R15 a R16, které slouží pouze k proudovému omezení při nabíjení vnitřní části vazebního zapojení, jsou zvoleny o hodnotě $100\text{ k}\Omega$. Z praktického hlediska, pokud není hodnota těchto rezistorů příliš nízká, aby ovlivnila vstupní impedanci zesilovače, není na jejich hodnotu kladen žádný přísný požadavek.

Dále zapojení obsahuje diody D1 – D6, které slouží jako přepěťové ochrany. Diody D1 a D2 chrání vstupní tranzistory obvodu 1512 a diody D3 – D6 zaručují maximální rozkmit vstupního napětí na hodnotu napájecího napětí zvýšené o napětí na diodě v propustném směru pro obě polaritu napájení. Tento systém vychází z doporučeného zapojení mikrofonního předzesilovače THAT1512 uvedeného v katalogovém listu. Pro regulaci zisku je použit původní potenciometr anti-logaritmického průběhu o hodnotě $5\text{ k}\Omega$. Pro omezení maximálního zisku je do série vložen rezistor o hodnotě $10\ \Omega$.

Linková část vstupu dále obsahuje sériové rezistory R10 a R11, které slouží jako útlumový článek spolu s impedancí mikrofonního zesilovače, ke kterému jsou tyto rezistory připojeny pomocí vazebních kondenzátorů C16 a C17. Hodnota útlumu tohoto napěťového děliče je 20 dB . To umožňuje zapojení pojmout signál teoreticky až o hodnotě $+40\text{ dBu}$. Rezistory R12 a R13 pak definují klidový potenciál. Pro linkový vstup tedy vychází vstupní impedance přibližně $20\text{ k}\Omega$ diferenciálně, což je běžná hodnota linkových vstupů.

4.4 Návrh stejnosměrného serva

Na výstupu integrovaného zesilovače je vždy rezistor R9 o hodnotě $10\ \Omega$, který zde zajišťuje ochranu proti parazitním vlivům okolí a vstupní kapacitě operačního zesilovače na hlavní DPS převodníku, který je použit jako buffer. Tato kapacita by vzhledem ke způsobu napájení mohla vést k vysokofrekvenčním oscilacím vznikajícím na výstupu obvodu THAT1512. Před tímto rezistorem je vždy spojen vstup stejnosměrného serva, který je tvořen rezistorem R1 nebo R2 a kondenzátorem C1 nebo C2, viz obrázek 4.5. Toto invertující zapojení s operačním zesilovačem OP07 tvoří dolní propust o mezní frekvenci $0,16\ \text{Hz}$. Výstup z tohoto serva je veden vždy do příslušného referenčního vstupu obvodu THAT1512. V tomto zapojení tak můžeme očekávat na výstupu THAT1512 pouze napětí rovnající se napětovému offsetu obvodu OP07, jehož hodnota může být dle katalogových údajů v jednotkách μV .



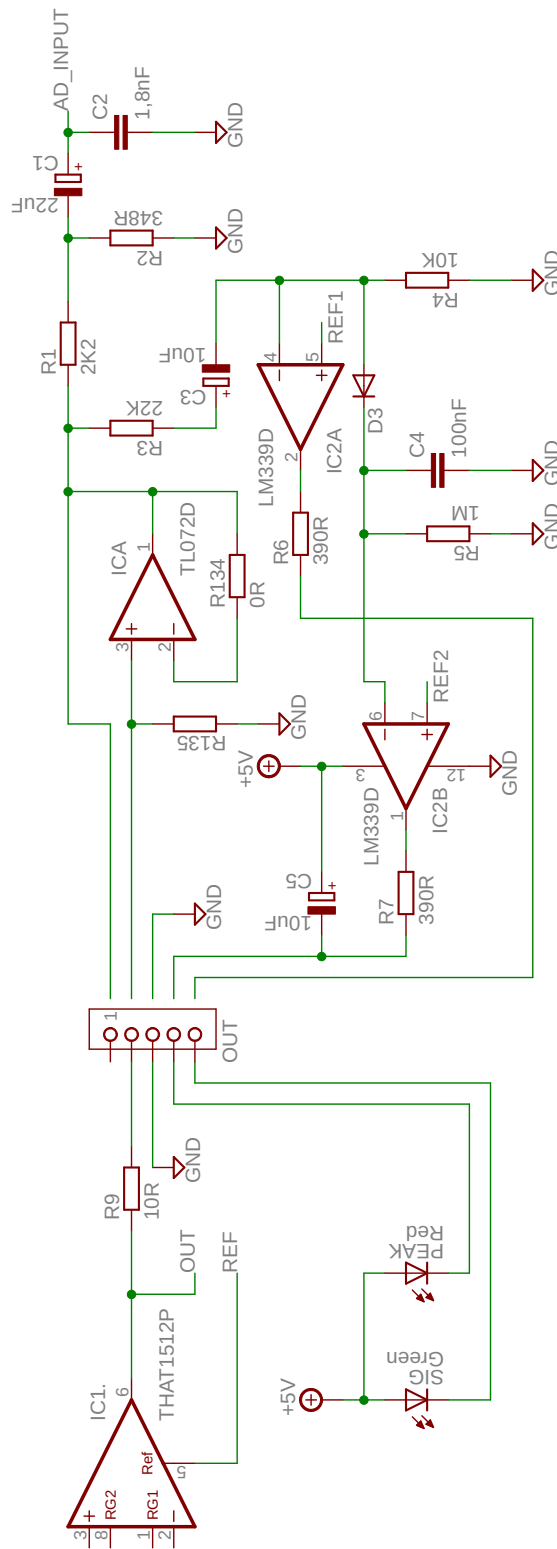
Obr. 4.5: Schéma zapojení stejnosměrného serva pro dva mikrofonní předzesilovače

4.5 Návrh indikace a ovládání fantomového napájení

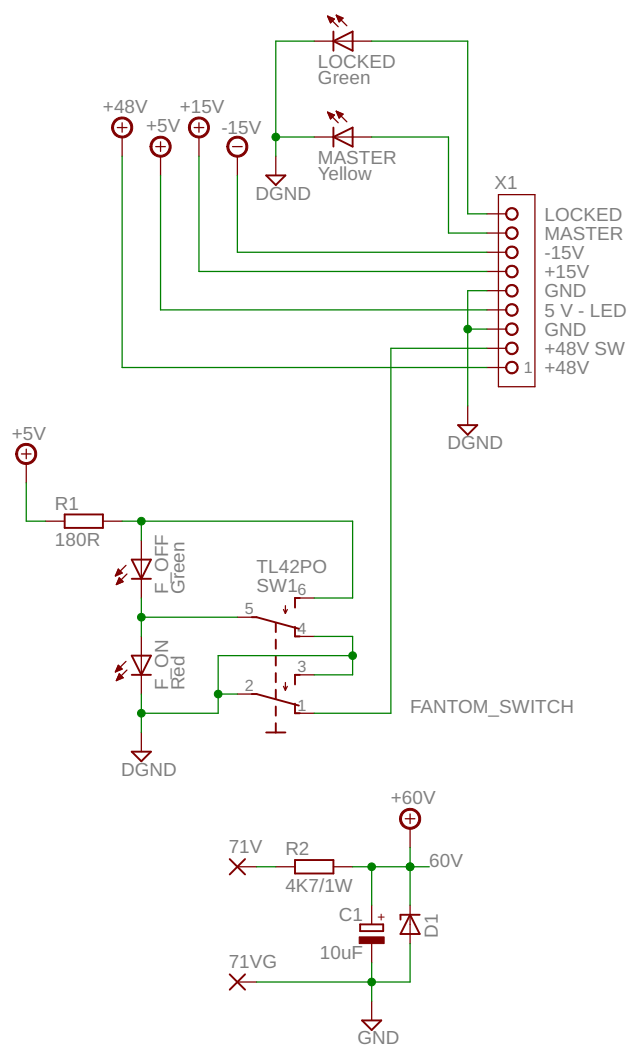
Každý kanál má disponovat indikací přítomnosti signálu, která je řízená z hlavní DPS. Řízení je provedeno tak, že je na této desce zapojení s komparátorem LM339, které drží na svých výstupech napětí 5V. V případě, kdy je hladina signálu vůči jisté referenci překročena, je výstup komparátoru 0V. Indikační LED diody SIG a PEAK jsou na DPS s předzesilovači připojeny svými anodami na 5V. Jejich katody jsou poté vedeny pomocí drátových spojů spolu se signálem do hlavní desky DPS. Takto je realizována indikace přítomnosti signálu a indikace přebuzení, schéma zapojení je uvedeno na obrázku 4.6.

Zapojení řízení fantomového napájení bylo převzato z původní konstrukce, jelikož je jeho funkčnost a jednoduchost mnohoznačně výhodná a to především proto, že na hlavní DPS nebude zapotřebí jakýchkoli změn z tohoto hlediska. Zapojení je zobrazeno na obrázku 4.7. Na něm je také zobrazen způsob signalizace režimu master a synchronizace toku audio dat. Ta je zde velmi prostá. Dvě LED diody jsou katodami připojeny na zem a jejich aktivace je řízena kladným napětím z hlavní DPS. Zapojení diod „fantom ON/OFF” je tvořeno napájením 5V, proud omezujícím odporem R1 a LED diodami zapojenými se spínačem SW1.

Usměrněné napětí o hodnotě cca 71V pro fantomové napájení (před stabilizátorem LM317) na hlavní DPS vykazuje z principu zapojení jisté zvlnění, jelikož se jedná o napětí hned za usměrňovačem. Toto napájecí napětí je vedeno do DPS s předzesilovači pomocí dvou vodičů. Zvlnění je filtrováno rezistorem R2 a kondenzátorem C1. Zenerova dioda D1 poté funguje jako primitivní regulátor napětí, což v tomto případě plně postačuje. Takto je vytvořeno napětí o hodnotě 60V pro elektrolytické vazební kondenzátory. Zapojení je rovněž vidět na obrázku 4.7.



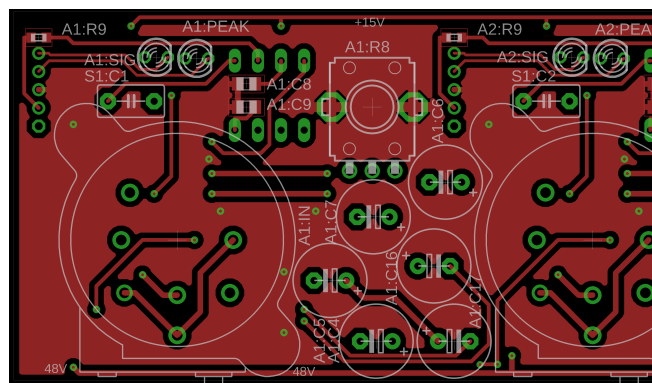
Obr. 4.6: Schéma zapojení indikačních LED diod pro přítomnost signálu a přebuzení



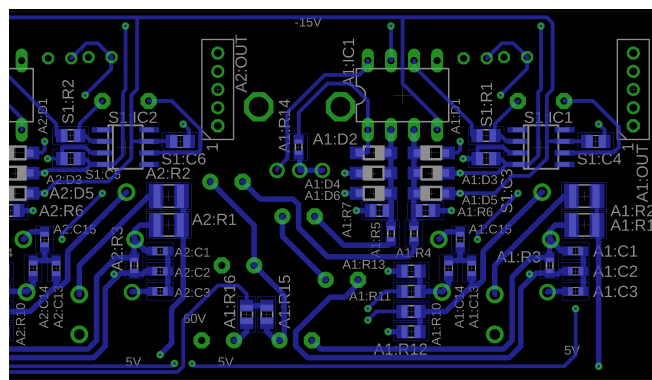
Obr. 4.7: Schéma zapojení polarizačního a fantomového napájení a jeho řízení, indikace synchronizace a režim „master”

4.6 Návrh desek plošných spojů

Pro návrh desek plošných spojů byl využit program Eagle verze 8.5. V návrhu jsou použity jak součástky THT tak SMD z důvodu velmi omezeného prostoru. Možnost realizovat desku plošných spojů vodorovně nepřichází v úvahu vzhledem k velikosti a umístění vstupních konektorů. Proto musela být deska navržena stejným způsobem, jako v původním řešení, tedy vertikální XLR/JACK konektory a deska plošných spojů umístěná v hliníkovém panelu svisle, napříč panelem. Možné řešení s konektory propojenými pomocí drátových spojů by sice bylo také realizovatelné, avšak z důvodu vysokých požadavků na odstup signálu od šumu je zapotřebí signál co nejlépe stínit a zabezpečit, aby signálové vodiče mezi deskou a konektorem byly co nejkratší. To je další důvod pro již zmíněný způsob řešení. Dalším z důvodů je použití původních potenciometrů, které lze umístit na DPS pouze v rámci původního designu.



(a) Strana TOP



(b) Strana BOT

Obr. 4.8: Náhled návrhu desek plošných spojů pro jeden kanál

Nejrozměrnějšími součástkami jsou konektory, vazební kondenzátory, potenciometr a potažmo integrovaný obvod THAT1512. Ostatní součástky nejsou tak rozměrné. V místech, kde byl původně jackový konektor jsou nyní umístěny vazební kondenzátory. To byl hlavní důvod pro použití kombinovaného konektoru Neutrik řady I. Potenciometr pro regulaci zisku musel být umístěn do původní pozice, stejně tak indikační diody. Tyto fakta vedly k použití ostatních součástek typu SMD, kromě fóliových kondenzátorů pro stejnosměrné servo, které musí mít nízké svodové proudy. V daných kapacitách se žádné fóliové kondenzátory typu SMD na trhu nenachází. Spodní část desky plošných spojů je osazena velkým množstvím součástek o velikosti 0603, nebo 0805. To jsou rezistory a keramické kondenzátory, jejichž rozměry mohou být takto malé. Pro fantomové napájení jsou zde však rezistory o velikosti 1210, které mají dostatečný ztrátový výkon, aby byly schopny odolat zkratování vstupních svorek. Ochranné diody jsou rovněž typu SMD a jejich velikost je zvolena s ohledem na rozměry a maximální proud, který těmito diodami může protéct.

Zemní plocha je na horní vrstvě. Symetrické napájení je vedeno u horní hrany desky a to přesně pod sebou, aby proudová smyčka byla co nejužší. Fantomové a polarizační napájení je vedeno na spodní straně desky, kde je rovněž vedeno 5 V napájení pro LED diody. Toto napájecí napětí nepodléhá zásadním kritériím, proto tento vodič přechází z jedné vrstvy na druhou pomocí prokovů. Důvod k tomuto řešení jsou odbočky napájecí sběrnice fantomového a polarizačního napájení, u kterých každá přidaná indukčnost může ovlivnit výsledek návrhu mnohem více, než u 5 V napájení LED diod.

Vzhledem k rozměrovým důvodům byl na spodní vrstvu umístěn integrovaný obvod THAT1512. Ten by správně jakožto součástka typu THT měl být umístěn spolu s ostatními součástkami na horní vrstvě. Vzhledem k tomu, že se nejedná o sériovou výrobu, ale o ruční osazení a pájení jen několika kusů, je tato porušená zásada přijatelná.

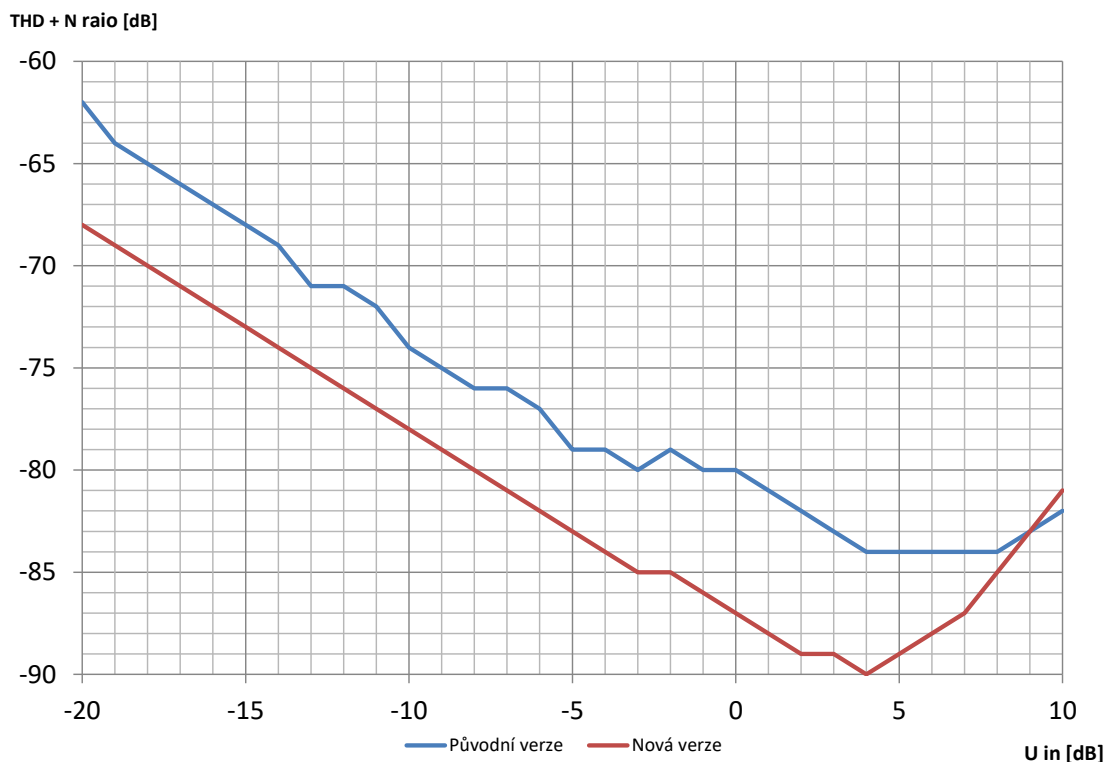
5

Realizace a měření

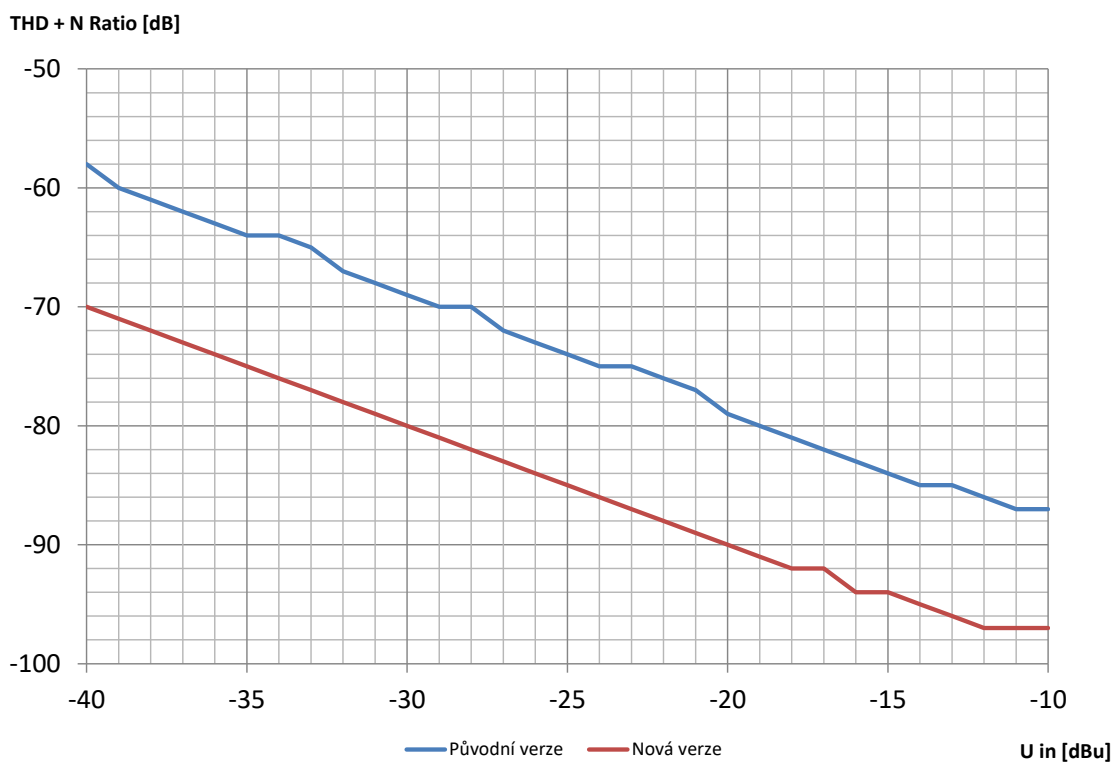
5.1 Realizace a měření

Deska plošných spojů byla vyrobena firmou PragoBoard. Zařízení bylo sestaveno a byly změřeny jeho parametry. Měření probíhalo, stejně jako v případě s původními předzesilovači. Je využit datový konvertor RME ADI-192 DD, který převádí výstupní datový tok ADAT z převodníku Behringer na formát AES/EBU. Ten je poté přiveden do digitálního vstupu měřicího analyzátoru AP 582. Konvertor RME je zároveň generátorem signálu world clock pro převodník Behringer. Pro generování signálů pro vstupy převodníku byly využity symetrické analogové výstupy analyzátoru AP 582.

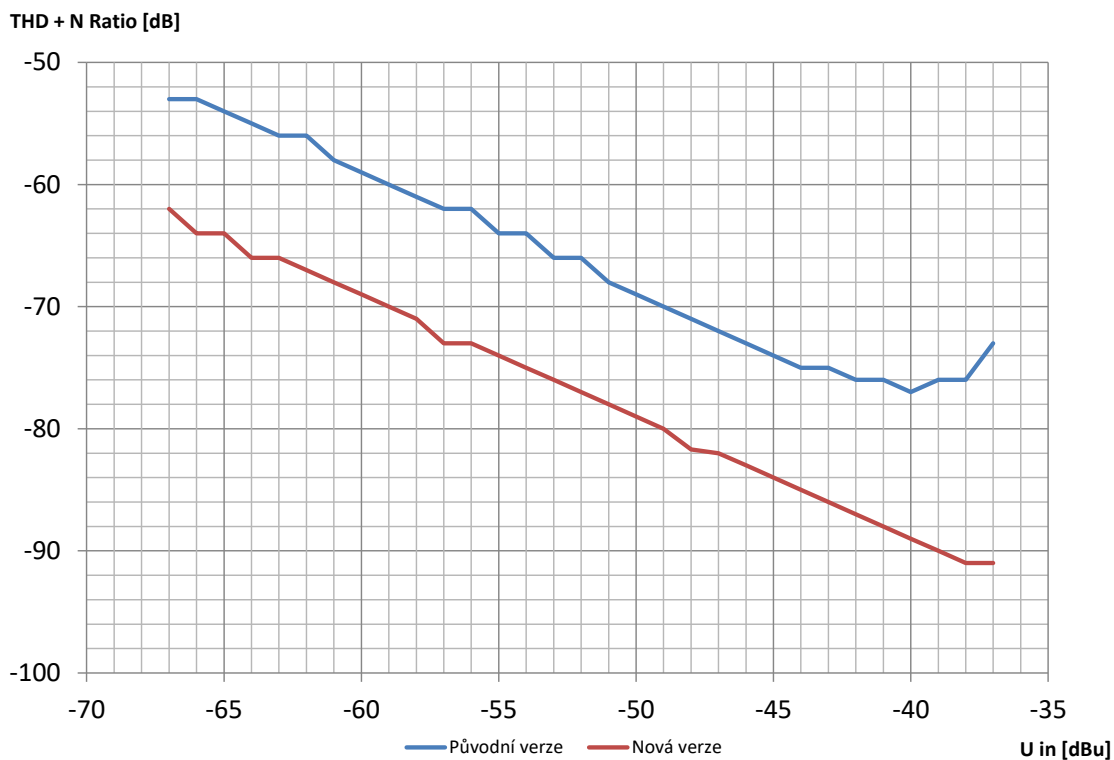
Výsledky měření celého zařízení s novým předzesilovačem vykazují silné zlepšení všech parametrů při vyšších nastaveních zisku. Dynamická hloubka se ve většině případů zvýšila o více, než 10 dB. Hodnoty harmonického zkreslení nejsou téměř měřitelné pod úrovní šumu, která byla snížena, jak již bylo zmíněno. Intermodulační zkreslení a jeho průběhy sice pro nejnižší úroveň zesílení dosahují téměř shodných parametrů, nikoliv však horších. Výsledky měření odstupu signálu od harmonického zkreslení a šumu jsou v porovnání s předchozí verzí uvedeny na obrázcích 5.1 až 5.3. Na obrázcích 5.4 až 5.6 jsou pak uvedené odstupy intermodulačního zkreslení. V tabulce 5.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty dynamického rozsahu.



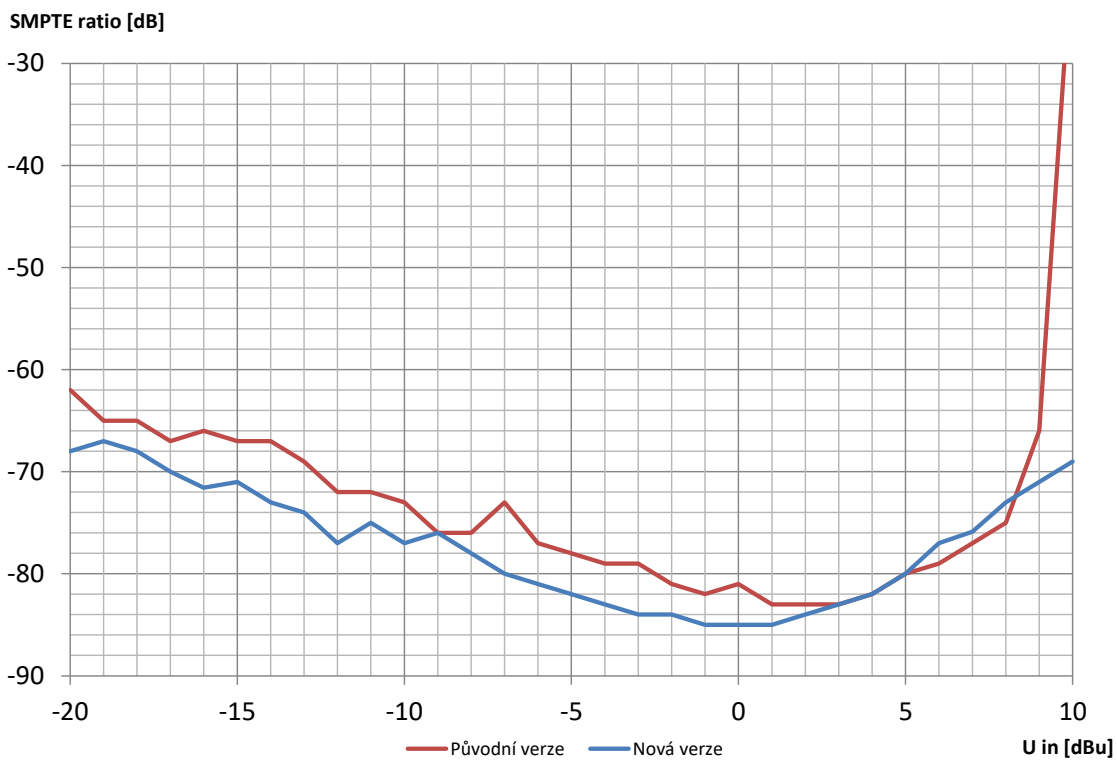
Obr. 5.1: Odstup signálu od šumu a harmonického zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 10 dB



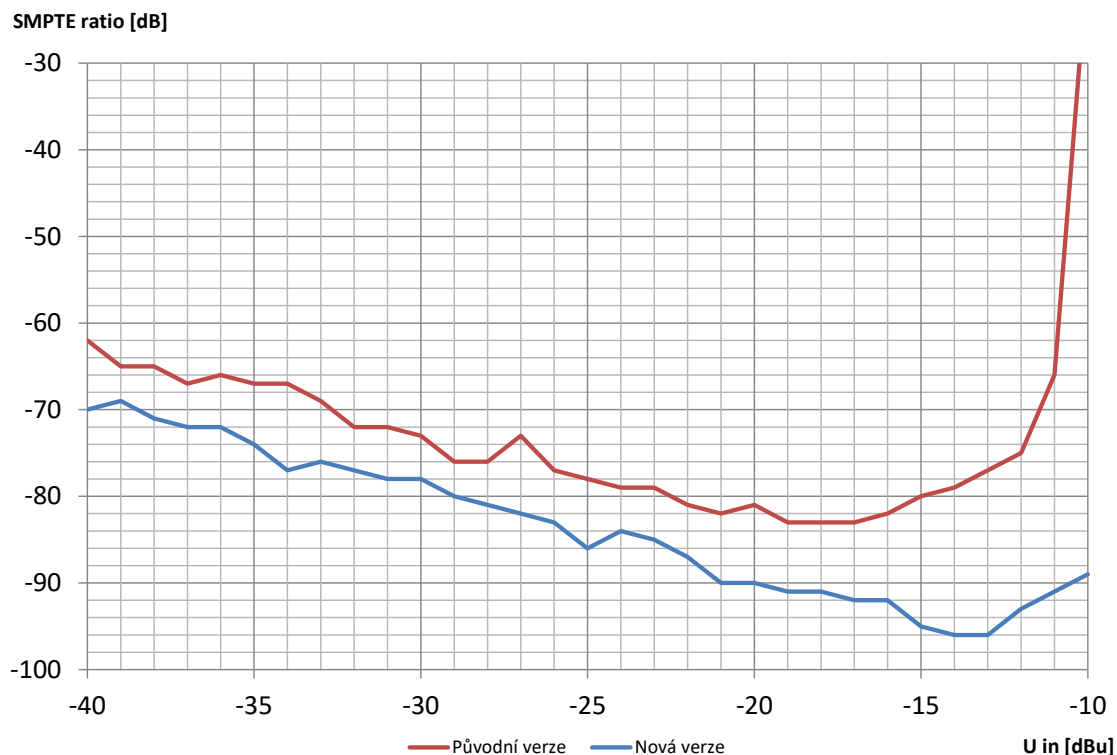
Obr. 5.2: Odstup signálu od šumu a harmonického zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 30 dB



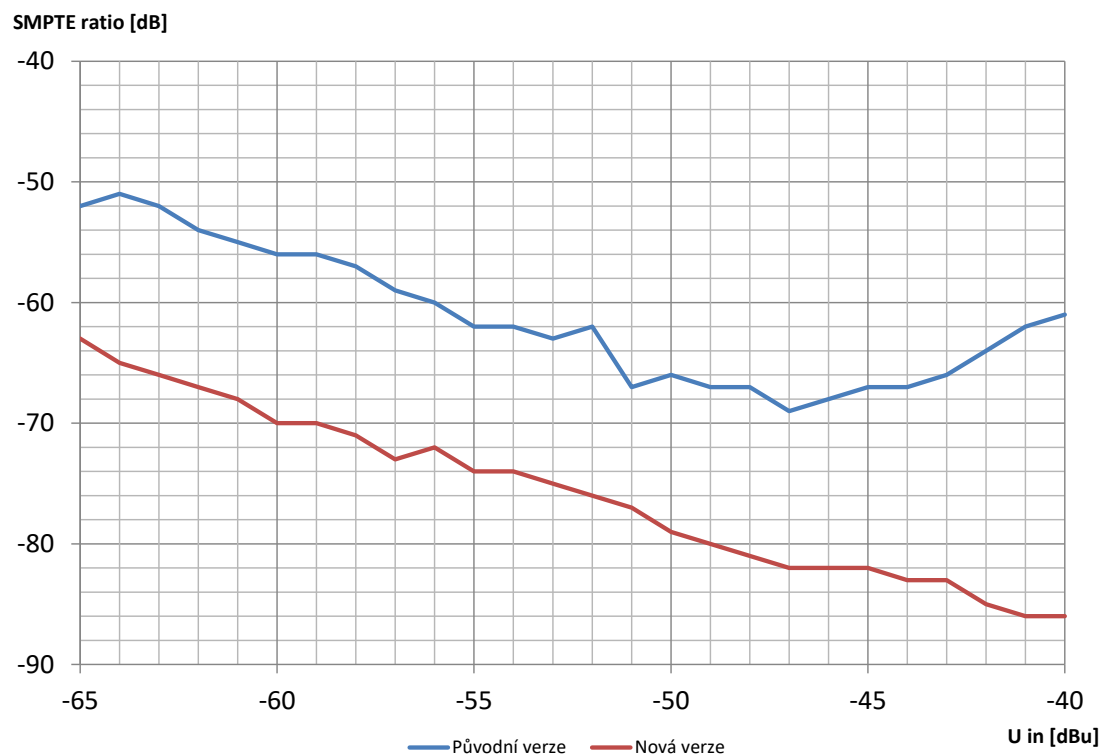
Obr. 5.3: Odstup signálu od šumu a harmonického zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 60 dB



Obr. 5.4: Odstup intermodulačního zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 10 dB



Obr. 5.5: Odstup intermodulačního zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 30 dB



Obr. 5.6: Odstup intermodulačního zkreslení pro novou i původní verzi předzesilovače při nastaveném zisku 60 dB

Parametr	Hodnota
Dynamický rozsah @ 10 dB zesílení	103 dB
Dynamický rozsah @ 30 dB zesílení	103 dB
Dynamický rozsah @ 60 dB zesílení	95 dB

Tab. 5.1: Naměřené hodnoty dynamického rozsahu převodníku pro buzení -3 dBFs pro původní řešení

5.2 Indikátory přebuzení

Při měření nové sestavy bylo zjištěno, že indikace přebuzení nereaguje. Byly proto změněny hodnoty rezistorů nastavujících referenční úroveň pro komparátory LM339. Po této změně je indikace přebuzení nastavena při hodnotě -6 dBFs (odpovídá cca 14 dBu na výstupu předzesilovače) na AD převodníku. Při provozu tedy může náhodná a velmi krátká indikace znamenat pouze možnost, že v zařízení mohlo dojít k přebuzení. Chyba původního návrhu zřejmě byla způsobena nepochopením katalogového údaje AD převodníku. Tato verze totiž obsahuje AD převodníky Cirrus Logic, které mohou mít jinou maximální vstupní úroveň, než AD převodníky předchozí generace převodníku ADA8000. Podobná systémová závada se u výrobků této cenové kategorie může vyskytnout. Nutno podotknout, že vlastní návrh celého systému neměl na tento problém vliv, jelikož zdroj signálu pro vyhodnocení velikosti napětí se nachází za bufferem na hlavní desce plošných spojů a je realizovaný operačním zesilovačem TL072. Do této části systému nebylo nijak zasaženo.

5.3 Cenová kalkulace

Pro veškeré úpravy, ke kterým na měřicím systému došlo je zapotřebí znát také cenovou kalkulaci. V kapitole 2 jsou vysvětleny důvody výběru těchto převodníků. Celková odhadovaná cena uvedená v následující tabulce nezahrnuje práci návrhu a přestavby, avšak i s touto položkou by byla výsledná cena řádově nižší, než pořizovací cena 8 kusů převodníků např. RME Micstasy v hodnotě 100 000 korun za jeden kus.

Položka	Cena/kus	Kusů	Celkem
AD převodník Behringer ADA8000	5 000 Kč	8	30 000 Kč
Součástky na přestavbu	2 000 Kč	1	2 000 Kč
Integrované obvody THAT1512	140 Kč	100	14 000 Kč
Desky plošných spojů	1 500 Kč	8	12 000 Kč
Cena celkem			58 000 Kč

Tab. 5.2: Cenový odhad nákladů pro pořízení AD převodníků

6

Závěr

V této práci byly prostudovány možnosti použití profesionálního převodníku Behringer ADA8000 pro měřicí účely (v kapitole 2), konkrétně měření difuzity. Pro toto měření byl sestaven měřicí systém, jehož součástí jsou již zmiňované převodníky. Následně byly definovány požadavky na převodníky, a byly změřeny jejich parametry (kapitola 3).

Podle rozdílů požadovaných a skutečných hodnot byly navrženy úpravy, které byly realizovány. Tyto úpravy spočívají v návrhu nového mikrofonního předzesilovače a některých pomocných obvodů. Pro jednoduchost a realizovatelnost úprav byla navržena deska plošných spojů stejným způsobem, jakým byly realizovány mikrofonní předzesilovače v původním řešení. Celý návrh je uveden v kapitole 4.

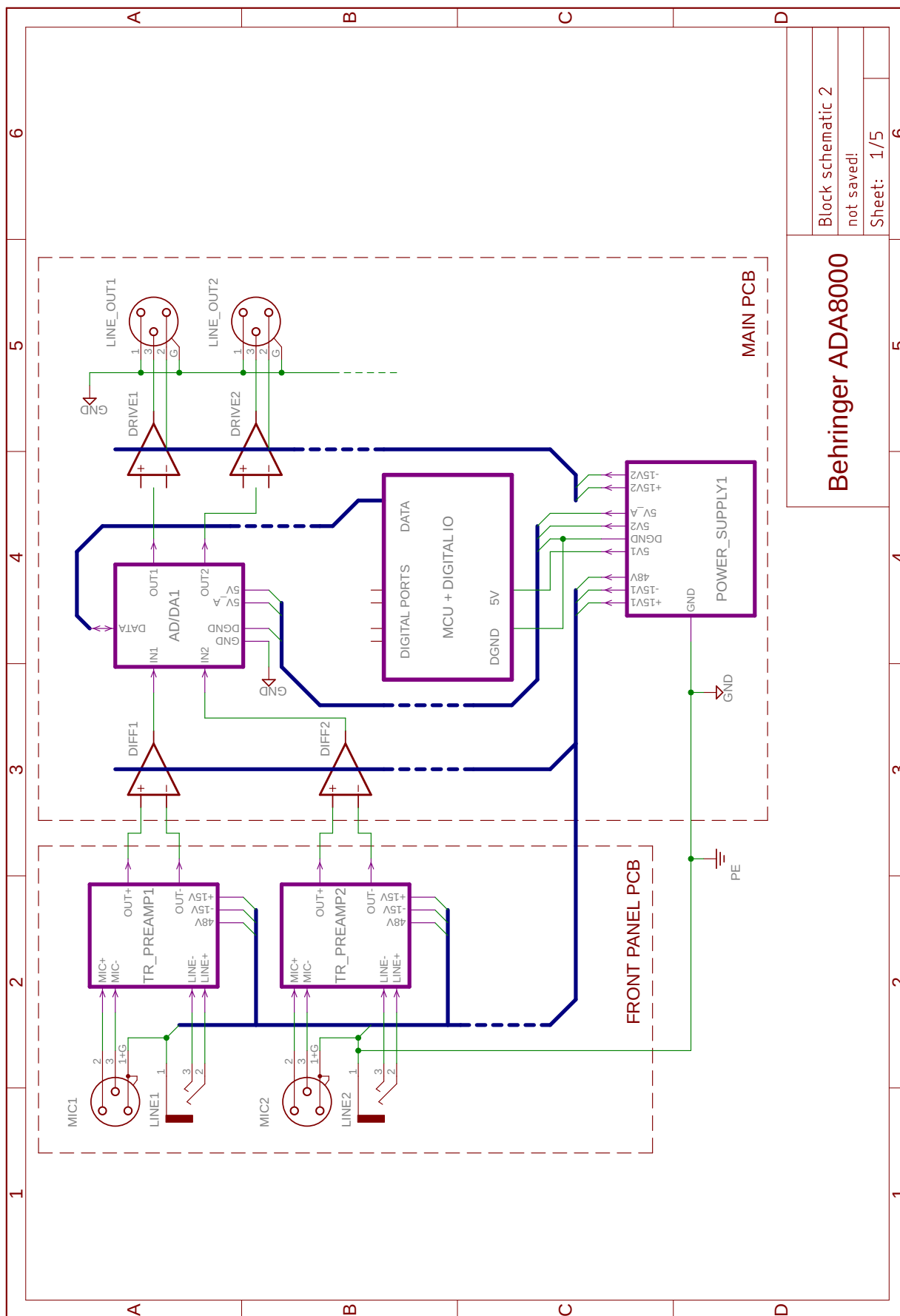
V porovnání s původním řešením vykazuje nové řešení výrazné zlepšení parametrů, zejména odstup signálu od harmonického zkreslení a šumu, z čehož vyplývá daleko vyšší dynamická hloubka. Při vyšších zesíleních vzrostl i odstup intermodulačního zkreslení, byť pro nejnižší možné zesílení se téměř neliší. Mikrofonní předzesilovače schopné vysokých zisků obvykle vynikají svými parametry právě až po nastavení určitého zesílení. Na základě měření konkrétních napěťových hladin bylo zjištěno, že indikace přebuzení nereaguje na správnou hodnotu napětí. Proto byly upraveny referenční úrovně na hlavní desce plošných spojů. Z grafu pro maximální zisk je například patrné, že při vstupní úrovni -40 dBu je odstup signálu od šumu roven -90 dB. To znamená, že při plném zisku je hodnota ekvivalentního vstupního šumu přibližně -130 dBu, pro zisk 30 dB je pak tato hodnota -110 dBu. Další možná vylepšení by mohla být realizována v oblasti nízkých zesílení, kde mohou mít některé komponenty vliv na úroveň zkreslení.

Literatura

- [1] SELF, Douglas. *Small Signal Audio Design*. Burlington, MA, USA, Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0.
- [2] SELF, Douglas. *The Design of Active Crossovers*. Waltham, MA, USA, Focal Press, 2011. ISBN 978-0-240-81738-5.
- [3] SELF, Douglas. *Audio Power Amplifier Design Handbook*. Burlington, MA, USA, Focal Press, 2009. ISBN 978-0-240-52162-6
- [4] TUREČEK, Oldřich, ZUZJAK, Ladislav, TUČEK, Jan a SCHLOSSER, Martin. *Měřicí systém pro měření akustických parametrů difuzorů*. Plzeň, 2014. projekt č. MPOFR-TI4/569
- [5] *Noise Analysis In Operational Amplifier Circuits*. Texas Instruments, Incorporated, 2004. <http://www.ti.com/lit/an/slva043b.pdf>
- [6] *Analog Secrets Your Mother Never Told You*. HERBERT, Gary, TYLER, Les, BORTONI, Ros a MOSES, Bob. New York, USA, 2007. 123rd AES Convention.
- [7] *More Analog Secrets Your Mother Never Told You*. THAT Corporation, New York, USA, 2009. 127th AES Convention.
- [8] HERBERT, Gary K. *Designing Microphone Preamplifiers*. San Francisco, CA, USA, 2010. 129th AES Convention.
- [9] DAVIS, Don. *Sound System Engineering*. Burlington, MA, USA, 2006. ISBN 978-0-240-81846-7.

Příloha A

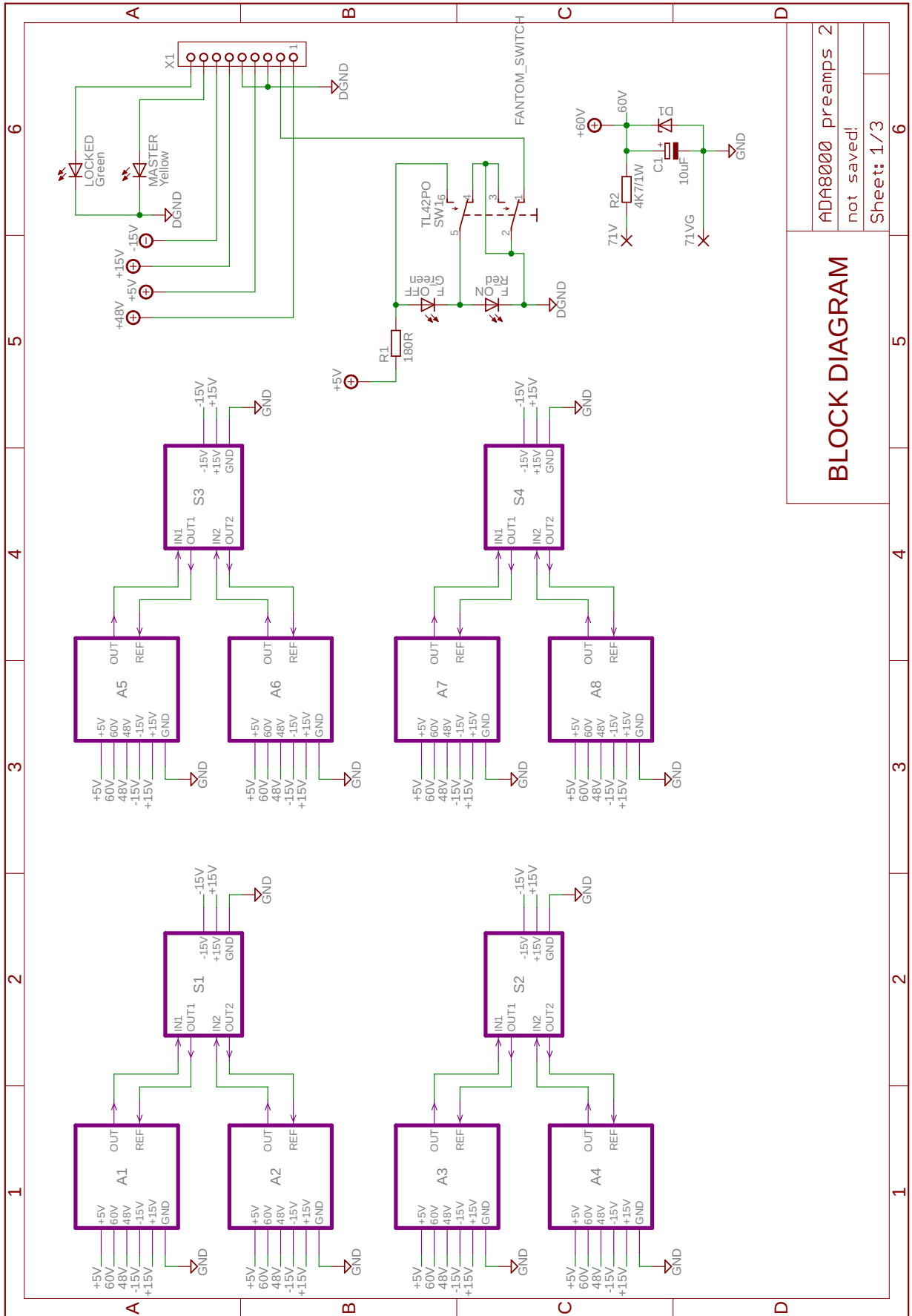
Schémata zapojení



Block schematic 2	6
not saved!	6
Sheet: 1/5	6

Behringer ADA8000

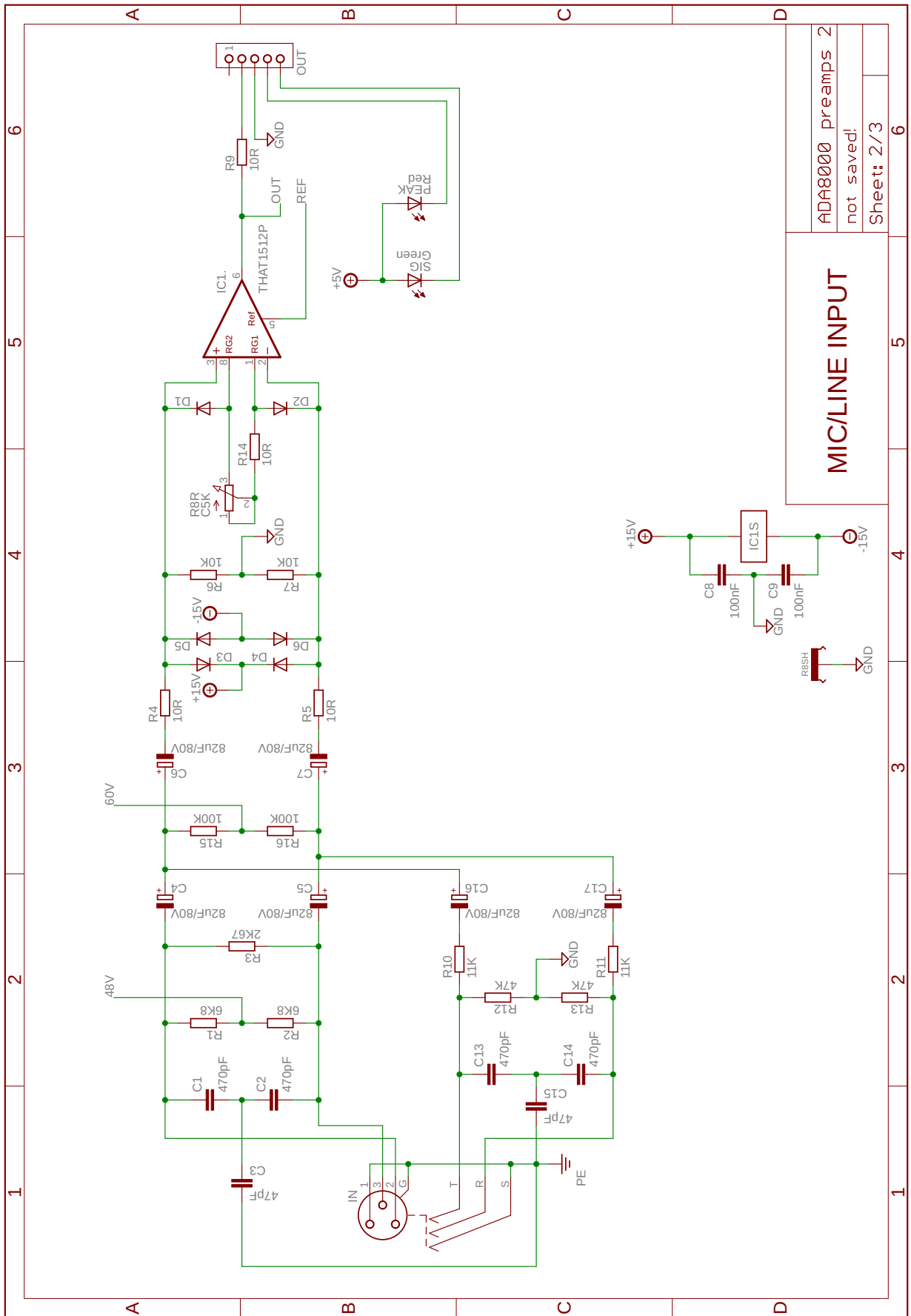
Obr. A.1: Blokové schéma převodníku Behringer ADA8000



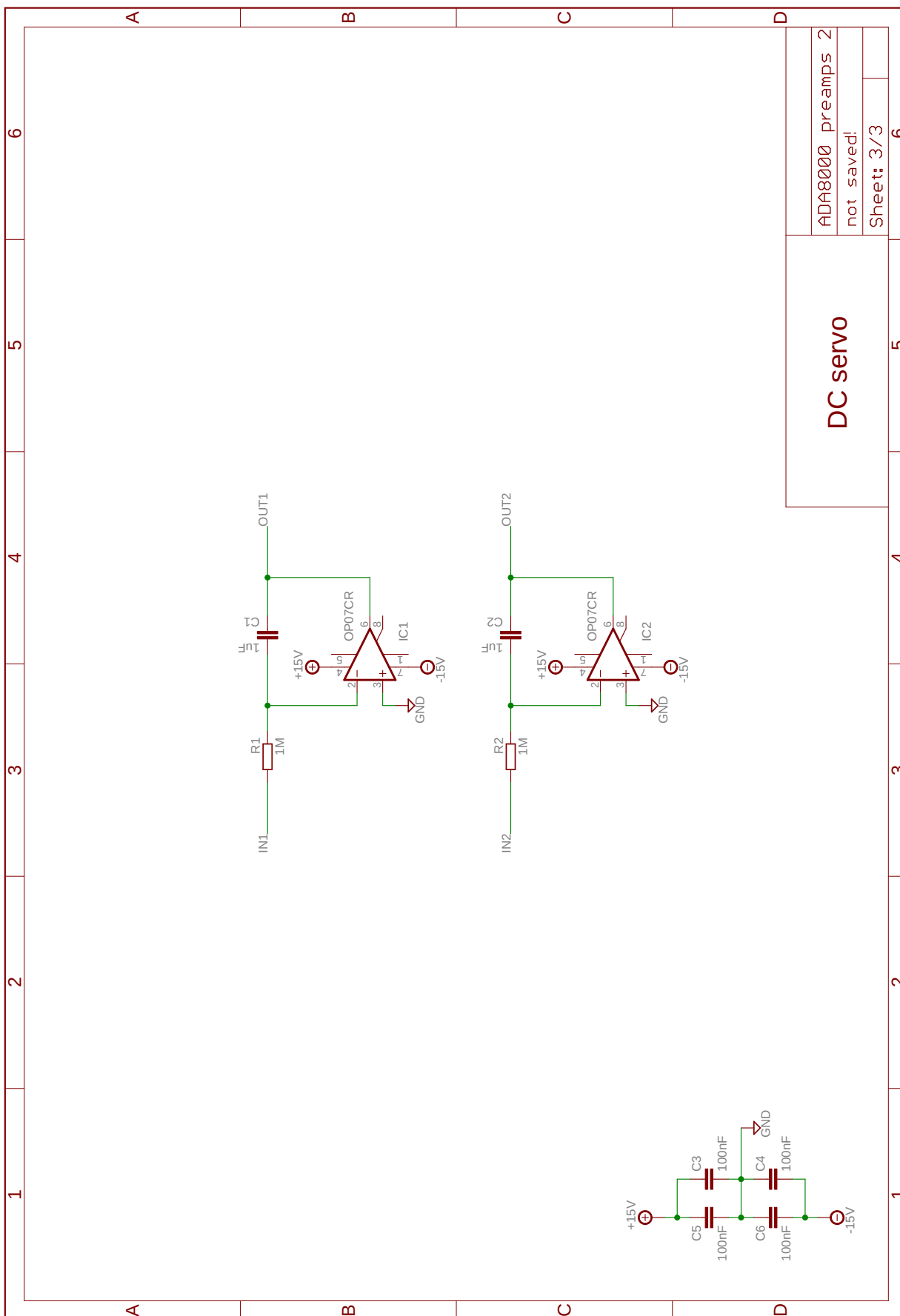
ADA8000 preamps 2	
not saved!	
Sheet: 1/3	6

BLOCK DIAGRAM

Obr. A.2: Blokové schéma a schéma napájení předzesilovačů



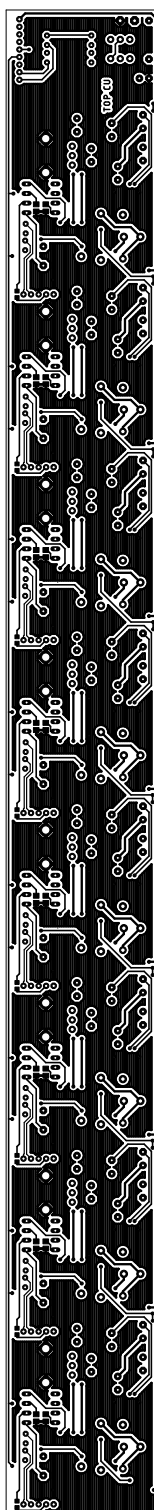
Obr. A.3: Schéma zapojení jednoho modulu předzesilovače



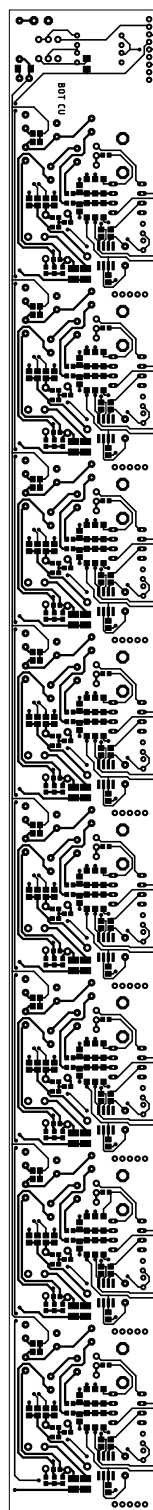
Obr. A.4: Schéma zapojení jednoho modulu stejnosměrného serva

Příloha B

Deska plošných spojů

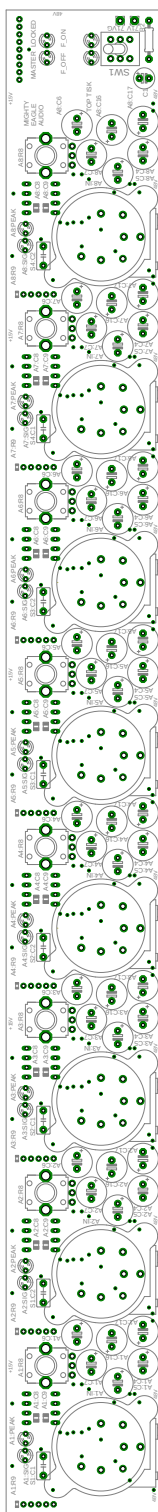


(a) Strana TOP

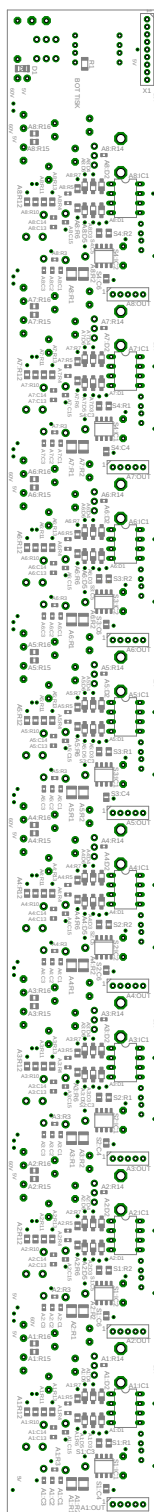


(b) Strana BOT

Obr. B.1: Motivy plošného spoje v měřítku 1:2



(a) Strana TOP



(b) Strana BOT

Obr. B.2: Osazovací výkresy plošného spoje v měřítku 1:2