



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ZESILOVAČ PRO MĚŘENÍ ELEKTROAKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMUNIKÁTORŮ

PRECISION AMPLIFIER FOR ACOUSTIC CHARACTERIZATION OF HEADSETS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Kadlec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Matěj Kadlec

ID: 230264

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Zesilovač pro měření elektroakustických vlastností komunikátorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a vyrobte mikrofonní a sluchátkové měřicí zesilovače pro mikrotelefon a náhlavní sadu (komunikátor). Mikrofonní předzesilovač bude vybaven symetrickým vstupem s konektorem XLR-TRS Combo s vypínatelným fantomovým napájením P48 a s elektrickým rozhraním podle IEC 61938 a nesymetrickým vstupem s elektrickým rozhraním podle ITU-T Rec. P.381. Sluchátkový zesilovač bude umožňovat použití stereofonního i monofonního vstupního signálu a jeho elektrické rozhraní bude splňovat požadavky ITU-T Rec. P.381. Zesilovače budou vybaveny konektory RJ11, jack 3,5 mm a/nebo CTIA tak, aby bylo možné připojit mikrotelefon a všechny dostupné kombinace náhlavních sluchátek s mikrofonom či bez něj. Napájení zařízení musí být možné z baterie i z externího zdroje stejnosměrného napětí s ochranou proti přepólování. Zvlnění kmitočtové charakteristiky sluchátkového zesilovače v pásmu 20 Hz až 20 kHz musí být maximálně 0,5 dB, zvlnění mikrofonního předzesilovače musí být maximálně 1 dB. Zesilovače zabudujte do kovové skříňky a provedte měření všech relevantních audio parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] International Communication Union, Recommendation ITU-T P.381: Technical requirements and test methods for the universal wired headset or headphone interface of digital mobile terminals. Series P: Terminals and Subjective and Objective Assessment Methods, Voice Terminal Characteristics, 08/20012.
- [2] SELF, D. Small Signal Audio Design. Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 26.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem měřicího rozhraní dle doporučení ITU-T P.381 pro měření elektroakustických vlastností komunikátorů. Cílem je vytvořit návrh obvodového řešení zařízení, které bude sdružovat sluchátkový zesilovač a dva mikrofonní předzesilovače; pro elektretový mikrofon mikrotelefonu a pro standardní mikrofon s konektorem XLR a vypínatelným fantomovým napájením, včetně příslušných napájecích a pomocných obvodů.

KLÍČOVÁ SLOVA

phantomové napájení, KiCAD, předzesilovač, sluchátkový zesilovač

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with design of measurement interface compliant with ITU-T P.381 for measuring electroacoustic qualities of communication devices (e.g. headsets, handsets). Thesis provides design of main electrical circuit which combines headphone amplifier and two microphone preamplifiers – one for electret microphone and one for standard XLR microphone with optional phantom power. Power supply and auxiliary circuits are also considered in the design.

KEYWORDS

phantom power, KiCAD, preamplifier, headphone amplifier

KADLEC, Matěj. *Zesilovač pro měření elektroakustických vlastností komunikátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 67 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Matěj Kadlec
VUT ID autora: 23064
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Zesilovač pro měření elektroakustických vlastností komunikátorů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu semestrální práce panu Ing. Pavlu Hanákovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	17
Cíle práce	19
1 Teoretická část studentské práce	21
1.1 Požadavky ITU-T Rec. P.381	21
1.2 Požadavky zadání práce	22
1.2.1 Konektory	22
1.2.2 Napájení	22
1.3 Výběr součástí	23
1.3.1 Sluchátkový zesilovač	23
1.3.2 Mikrofonní předzesilovače	23
1.3.3 Linkové obvody	25
1.3.4 Napájení	25
1.3.5 Elektromechanické součástky	28
2 Výsledky studentské práce	29
2.1 Návrh nízkofrekvenční části	29
2.1.1 Sluchátkový zesilovač	29
2.1.2 Mikrofonní předzesilovače	32
2.1.3 Linkový budič	33
2.2 Návrh napájecích zdrojů	34
2.2.1 Hlavní zdroj $\pm 9\text{ V}$	34
2.2.2 Měnič pro fantomové napájení 48 V	36
2.2.3 Zdroj předpětí 2,6 V	37
2.3 Návrh DPS	37
2.4 Konstrukce zařízení	39
2.5 Měření	41
2.5.1 Symetrický mikrofonní předzesilovač	42
2.5.2 Nesymetrický mikrofonní předzesilovač	44
2.5.3 Sluchátkový zesilovač	46
2.5.4 Zhodnocení měření	48
Závěr	49
Literatura	51
Seznam symbolů a zkratk	53

Seznam příloh	55
A Dokumentace DPS	57
A.1 DPS – spoje TOP	57
A.2 DPS – spoje BOTTOM	58
A.3 DPS – osazení TOP	59
A.4 DPS – osazení BOTTOM	60
B Schémata	61
B.1 Schéma – sluchátkový zesilovač	61
B.2 Schéma – předzesilovač elektretového mikrofону	62
B.3 Schéma – předzesilovač XLR mikrofону	63
B.4 Schéma – linkový budič	64
B.5 Schéma – napájecí zdroje	65
C Obsah elektronické přílohy (výběr)	67

Seznam obrázků

1.1	Blokové schéma zařízení	21
1.2	Blokové schéma obvodu TPA6120 [4]	23
1.3	Blokové schéma obvodu THAT 1583 [7]	24
1.4	Blokové schéma linkových obvodů	25
1.5	Invertující nábojová pumpa s obvodem LT1054 [11]	26
1.6	Schéma měniče topologie boost [13]	26
1.7	Zapojení obvodu TL431 [10]	27
2.1	Schéma sluchátkového zesilovače	29
2.2	Zapojení při měření stability zesilovače TPA6120	30
2.3	Špičky zkreslení způsobené nábojovou pumpou	31
2.4	Napájení obvodu TPA6120	31
2.5	Schéma předzesilovače elektretového mikrofону	32
2.6	Schéma předzesilovače XLR mikrofону	33
2.7	Schéma linkového budiče	33
2.8	Schéma invertující nábojové pumpy	34
2.9	Vstupní obvody napájení	35
2.10	Měnič s obvodem LT8362	36
2.11	Zdroj předpětí s TL431	37
2.12	3D model navržené DPS	38
2.13	Fotografie hotového zařízení v krabici	39
2.14	Návrh popisů předního panelu	40
2.15	Návrh popisů zadního panelu	40
2.16	Kmitočtová charakteristika symetrického mikrofonního předzesilovače	42
2.17	Závislost zesílení a zkreslení symetrického mikrofonního předzesilovače na vstupní úrovni	43
2.18	Závislost zkreslení symetrického mikrofonního předzesilovače na frekvenci	43
2.19	Kmitočtová charakteristika nesymetrického mikrofonního předzesilovače	44
2.20	Závislost zesílení a zkreslení nesymetrického mikrofonního předzesilovače na vstupní úrovni	45
2.21	Závislost zkreslení symetrického mikrofonního předzesilovače na frekvenci	45
2.22	Kmitočtová charakteristika sluchátkového zesilovače	46
2.23	Závislost zesílení a zkreslení sluchátkového zesilovače na vstupní úrovni	47
2.24	Závislost zkreslení sluchátkového zesilovače na frekvenci	47

Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a realizací měřicího přípravku pro použití v laboratoři studiové a hudební elektroniky. Přípravek má sloužit pro měření elektroakustických vlastností mikrotelefonů, mikrofonů, sluchátek a jejich kombinací v podobě náhlavních sad. Doporučené elektrické i elektromechanické parametry takového zařízení jsou shrnuty v dokumentu ITU-T Rec. P.381 [1].

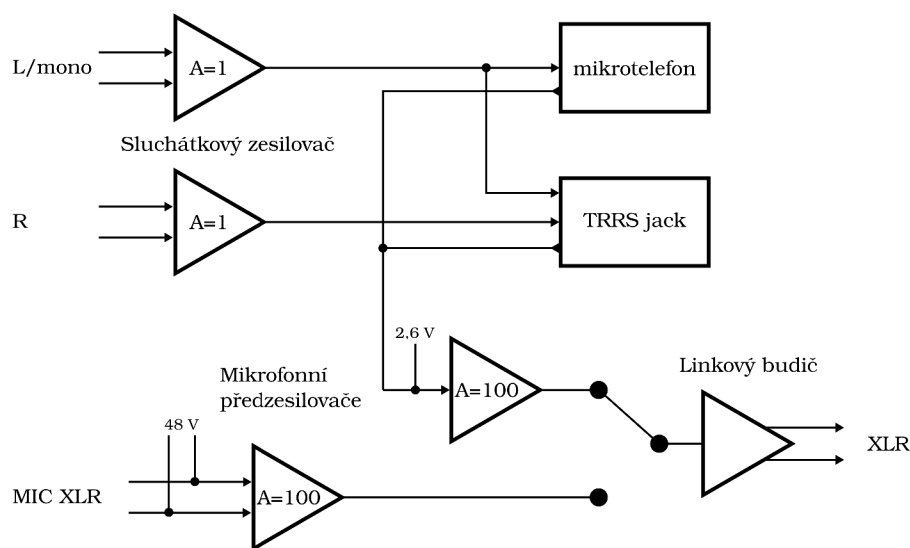
Teoretická část studentské práce rozebírá jednotlivé požadavky doporučení ITU a požadavky plynoucí ze zadání práce. S přihlédnutím k těmto nárokům je poté proveden výběr konkrétních součástek, které budou použity při realizaci zařízení. Nejkritičtějšími z nich jsou sluchátkový zesilovač, předzesilovače pro mikrofony, napájecí zdroje a připojovací konektory.

V praktické části práce je vytvořen návrh samotného zařízení s vybranými součástkami, odděleně pro nízkofrekvenční obvody a napájecí zdroje. Pomocí programu KiCAD je zpracována dokumentace v podobě elektrických schémat, podle kterých je vytvořen návrh desky plošných spojů. Následně je připravena dokumentace pro obrobění panelů krabičky a návrh popisu ovládacích prvků a konektorů. Měřením je ověřeno, zda bylo dosaženo požadovaných parametrů.

Cíle práce

Navrhněte a vyrobte mikrofonní a sluchátkové měřicí zesilovače pro mikrotelefon a náhlavní sadu (komunikátor). Mikrofonní předzesilovač bude vybaven symetrickým vstupem s konektorem XLR-TRS Combo s vypínatelným fantomovým napájením P48 a s elektrickým rozhraním podle IEC 61938 a nesymetrickým vstupem s elektrickým rozhraním podle ITU-T Rec. P.381. Sluchátkový zesilovač bude umožňovat použití stereofonního i monofonního vstupního signálu a jeho elektrické rozhraní bude splňovat požadavky ITU-T Rec. P.381. Zesilovače budou vybaveny konektory RJ11, jack 3,5 mm CTIA tak, aby bylo možné připojit mikrotelefon a všechny dostupné kombinace náhlavních sluchátek s mikrofonem či bez něj. Napájení zařízení musí být možné z baterie i z externího zdroje stejnosměrného napětí s ochranou proti přepólování. Zvlnění kmitočtové charakteristiky sluchátkového zesilovače v pásmu 20 Hz až 20 kHz musí být maximálně 0,5 dB, zvlnění mikrofonního předzesilovače musí být maximálně 1 dB. Zesilovače zabudujte do kovové skříňky a proveďte měření všech relevantních audio parametrů.

1 Teoretická část studentské práce



Obr. 1.1: Blokové schéma zařízení

Blokové schéma na obrázku 1.1 zobrazuje nízkofrekvenční část zařízení. Sluchátkový zesilovač a oba mikrofonní předzesilovače musí být navzájem nezávislé, společným prvkem jsou pouze kombinované konektory pro náhlavní sadu (TRRS jack) a kombinovaný konektor pro mikrotelefon. Předzesilovače jsou navrženy se zesílením 100, počítá se však s možností toto zesílení později upravit.

1.1 Požadavky ITU-T Rec. P.381

ITU-T Rec. P.381 [1] shrnuje doporučení na elektrické a akustické parametry analogových headsetů a sluchátek připojovaných k digitálním terminálům. Navrhuje metody měření těchto parametrů a zabývá se rovněž elektromechanickými požadavky na propojovací konektory zařízení.

Základní požadavky na elektrické rozhraní popisuje sekce 7 (*Electrical interface specification*). Tyto požadavky jsou stanoveny s ohledem na využití měřených zařízení převážně pro přenos lidského hlasu a jsou značně převýšeny požadavky této bakalářské práce, které jsou stanoveny v jejím zadání.

Dále je pro práci relevantní sekce 8 (*Headset specification*), která popisuje parametry měřicího rozhraní pro náhlavní sady/sluchátka s mikrofonom:

Tab. 1.1: Požadavky měřicího rozhraní

Výstupní napětí sluchátkového zesilovače	max. 150 ± 1 mV do zátěže 32Ω
Výstupní impedance sluchátkového zesilovače	$< 2 \Omega$
Předpětí pro mikrofon	$2,6 \text{ V} \pm 1 \%$
Sériový odpor předpětí	$2,2 \text{ k}\Omega \pm 2 \%$
Citlivost mikrofonního vstupu	-60 dBV

1.2 Požadavky zadání práce

1.2.1 Konektory

Vstup sluchátkového zesilovače má být symetrický s konektory XLR-TRS Combo. Při zapojení konektoru pouze do zdířky levého vstupu jsou oba kanály sluchátkového zesilovače připojeny paralelně a pracují v monofonním režimu. Viz obrázek 1.1.

Výstup sluchátkového zesilovače je přiveden na kombinovaný konektor 4p4c (RJ11) pro standardní mikrotelefon a na kombinovaný konektor jack 3,5 mm v zapojení CTIA stereo headset.

Zařízení obsahuje dva nezávislé mikrofonní předzesilovače. První předzesilovač je určen pro zesílení signálu z kombinovaného konektoru mikrotelefonu nebo headsetu dle doporučení ITU. [1] Druhý předzesilovač zesiluje signál ze symetrického konektoru XLR/TRS Jack, který má vypínatelné fantomové napájení +48 V. Volba mikrofonního předzesilovače je realizována posuvným přepínačem a výstup je přivezen přes linkový budič na konektor XLR.

1.2.2 Napájení

Zařízení má být možné napájet z baterie i z externího zdroje stejnosměrného napětí s ochranou proti přepólování. Pro napájení bylo zvoleno napětí +9 V, které dodává standardní 9V baterie typu PP3 nebo externí napájecí adaptér se souosým konektorem. Měl by být možný provoz z adaptéru s vloženou baterií takovým způsobem, aby se napětí z adaptéru nedostalo na svorky baterie.

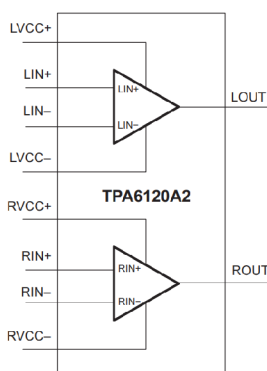
Mikrofonní vstup s konektorem XLR musí být vybaven tzv. fantomovým napájením P48 dle normy IEC 61938 [2]. Toto napětí bude vytvořeno pomocí zvyšujícího měniče topologie boost, což zvýší nároky na vhodné rozložení součástek na DPS pro minimalizaci rušení.

Integrované obvody pro zpracování nízkofrekvenčních signálů často vyžadují symetrické napájení. Poskytovat jej bude invertující nábojová pumpa bez regulace – záporná napájecí větev bude kopírovat napětí z baterie/adaptéru.

1.3 Výběr součástek

1.3.1 Sluchátkový zesilovač

Hlavními požadavky na sluchátkový zesilovač v zařízení jsou především vyrovnaná kmitočtová charakteristika a nízká výstupní impedace. Pro návrh je rovněž praktické, pokud má zesilovač symetrický vstup, což zvyšuje odolnost proti souhlasnému rušení, např. ze spínaného měniče. Vhodné je také, aby byl zesilovač dvoukanálový v jednom pouzdru. Nevýhodou při výběru bylo často nízké napájecí napětí (max. 5,5 V) u obvodů určených do zařízení napájených z baterií. Nakonec byl vzhledem k dobré dostupnosti a dobré reputaci i v komerčně vyráběných zařízeních zvolen pro sluchátkový zesilovač integrovaný obvod TPA6120 vyráběný společností Texas Instruments. Ten v zásadě splňuje všechny výše uvedené požadavky kromě



Obr. 1.2: Blokové schéma obvodu TPA6120 [4]

výstupní impedace. Výrobce v katalogovém listu doporučuje na výstup obvodu připojit do série se zátěží rezistory $39,2\ \Omega$, které mají oddělit případnou kapacitní zátěž, která by mohla zesilovač rozkmitat. [4]. Na těchto rezistorech však vzniká při připojení nižších zatěžovacích impedancí nezanedbatelný úbytek napětí, který podstatně mění přenos zesilovače. Ten sice zůstává nezávislý na frekvenci, mění se ale s velikostí impedance zátěže, která není pevně definována a pro různá měřená zařízení se může lišit. V praktické části práce je provedeno měření stability zesilovače s nižšími hodnotami těchto sériových rezistorů a úvaha nad použitím jiné formy zabránění vlivu kapacitní zátěže na zesilovač samotný.

1.3.2 Mikrofonní předzesilovače

Mikrofonní předzesilovače v zařízení musí být schopné zesílit signál z mikrofonu o nominální úrovni $-60\ \text{dBV}$ na vyšší úroveň, ideálně linkovou a nevnést do signálu

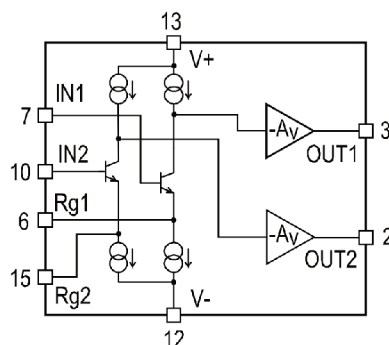
příliš velké množství nežádoucího šumu. Předzesilovač určený pro mikrofon s konektorem XLR musí mít symetrický vstup. Je žádoucí, aby výstup předzesilovače byl symetrický, což sníží náchylnost k pronikání rušení.

Na doporučení vedoucího práce byly pro všechny nízkofrekvenční aplikace (kromě sluchátkového zesilovače) vybrány obvody od společnosti THAT Corporation, která se specializuje na výrobu integrovaných obvodů pro audio zařízení. Mikrofonní předzesilovače tvoří řada 15xx, která nabízí několik možností pouzder, zkreslení, šumu, aj.:

Tab. 1.2: Mikrofonní předzesilovače THAT, přeloženo, upraveno z [5]

	1510	1512	1580	1583
Výstup	nesym.	nesym.	sym.	sym.
EIN				
0 dB, $R_s=0\ \Omega$	-99.7 dBu	-104.1 dBu	-109.4 dBu	-102.8 dBu
60 dB, $R_s=0\ \Omega$	-134.8 dBu	-134.8 dBu	-134.8 dBu	-128.9 dBu
60 dB, $R_s=150\ \Omega$	-128.9 dBu	-128.9 dBu	-128.9 dBu	-126.5 dBu
THD+N (60 dB)	0,005 %	0,008 %	0,005 %	0,006 %
Šířka pásma (-3 dB) 60 dB	3 MHz	1,6 MHz	0,4 MHz	0,19 MHz
Rychlost přeběhu	19 V/ μ s	19 V/ μ s	53 V/ μ s	50 V/ μ s
Pouzdra	SO-8, DIP-8 SO-14, SO16-Wide	SO-8, DIP-8 SO-14	QFN-16	QFN-16

Z tabulky se jako nejvhodnější jeví obvody THAT 1580 a 1583, ze kterých byl vybrán lepší (co se týče parametrů) z nich – THAT 1583. Cenový rozdíl oproti obvodu THAT 1580 činil v době návrhu zařízení asi 30 Kč.

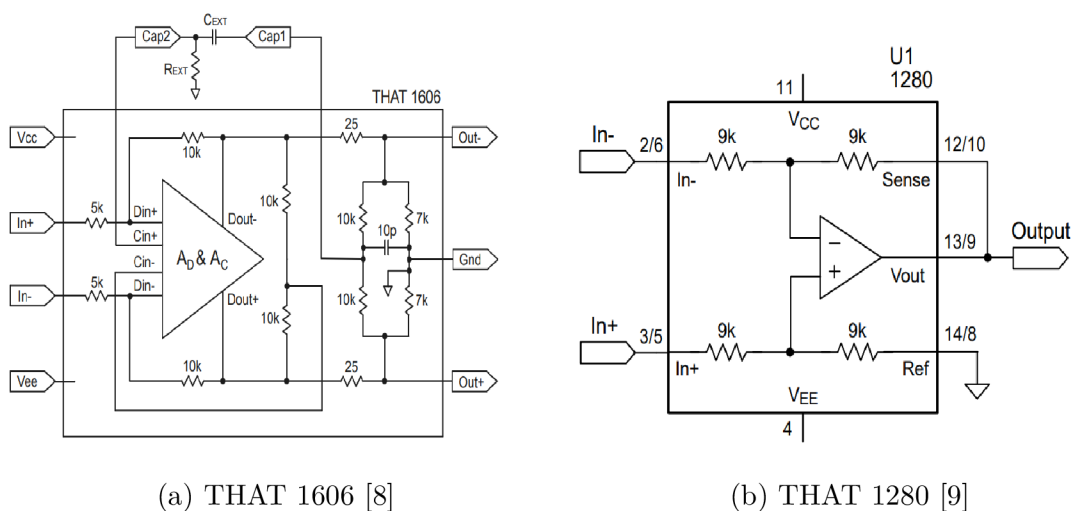


Obr. 1.3: Blokové schéma obvodu THAT 1583 [7]

1.3.3 Linkové obvody

Vstup sluchátkového zesilovače by bylo možné přivést přímo na jeho integrovaný obvod TPA6120, ten ale bude zapojen v invertujícím zapojení a bude mít vstupní impedanci rovnu odporu svého vstupního rezistoru. Jeho hodnota se obvykle pohybuje v jednotkách $k\Omega$. To je pro linkový vstup s nominální impedancí $10 k\Omega$ málo a obvod by mohl příliš zatěžovat budicí zařízení. Je mu proto předřazen linkový přijímač THAT 1280, který má typickou vstupní impedanci $18 k\Omega$. [9]

Výstup zesíleného signálu z mikrofonních předzesilovačů je třeba impedančně přizpůsobit pro linkové vedení. Opět byly vybrány obvody od společnosti THAT Corporation. Proto je za volič mikrofonního předzesilovače zařazen obvod THAT 1606, který výstup z předzesilovačů vhodně upraví. Pokud by předzesilovače neměly symetrický výstup, musel by z něj linkový budič vytvořit signál symetrický. (např. obvod THAT 1646) Alternativou mohly být např. obvody řad INA134 (linkové přijímače), resp. DRV13x (linkové budiče) od společnosti Texas Instruments.



(a) THAT 1606 [8]

(b) THAT 1280 [9]

Obr. 1.4: Blokové schéma linkových obvodů

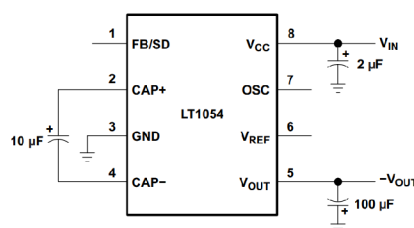
1.3.4 Napájení

Napájecí obvody zařízení musí umožňovat provoz z 9V baterie i externího adaptéru, s minimálním průnikem rušení do nízkofrekvenční části. Zároveň musí být schopné pokrýt proudové špičky sluchátkového zesilovače vznikající při dynamických maximech vstupního signálu a nízké impedanci jeho zátěže.

Zdroj záporného napájecího napětí je řešen jako invertující neregulovaná nábojová pumpa. Ta pouze invertuje své vstupní napětí a tvoří tak primitivní „tracking“ zdroj, který udržuje napájecí napětí stále symetrické. Pokud by bylo nutné napětí

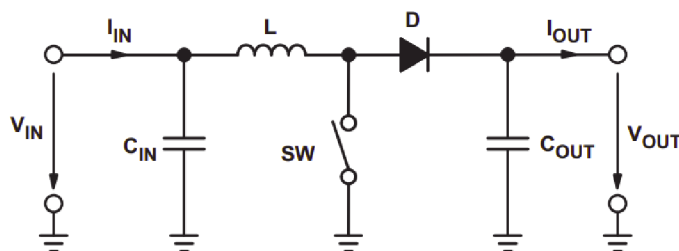
zdroje regulovat, muselo by tak být učiněno na obou napájecích větvích, což by ale přineslo ztrátu v podobě úbytku napětí na regulátorech.

Pro tuto aplikaci byl vybrán integrovaný obvod LT1054, který v současné době vyrábí více společností. Vychází z velmi používaných obvodů LT1044 a ICL7660, proti kterým má nižší vnitřní impedanci a pracuje na vyšší frekvenci (25 kHz). Obvod obsahuje i regulátor výstupního napětí, který ale v zařízení nebude využit. Připojením kondenzátoru s kapacitou 5–20 pF mezi vývody 7 a 2 lze zvýšit pracovní frekvenci obvodu, což je výhodné – frekvence bude posunuta mimo zvukové pásmo (vyšší desítky kHz), které tak nebude náchylné na zarušení.



Obr. 1.5: Invertující nábojová pumpa s obvodem LT1054 [11]

Fantomové napájení +48 V je vytvářeno pomocí spínaného zvyšujícího měniče topologie boost. Odběr z tohoto zdroje nebude příliš vysoký, v nejhorsím možném případě (zkrat na zem) je fantomové napájení zatíženo svými sériovými rezistory, které mají pro verzi P48 hodnotu 6,8 k Ω . To odpovídá proudu asi 14 mA. Reálný proudový odběr mikrofonů s fantomovým napájením však bývá v řádu jednotek mA. Hotové řešení této problematiky je popsáno např. u společnosti Analog Devices [12], použitý integrovaný obvod byl však v době výběru nedostupný.



Obr. 1.6: Schéma měniče topologie boost [13]

Integrovaných obvodů pro tento účel existuje obrovské množství, pro zúžení výběru byly nejdůležitější následující parametry:

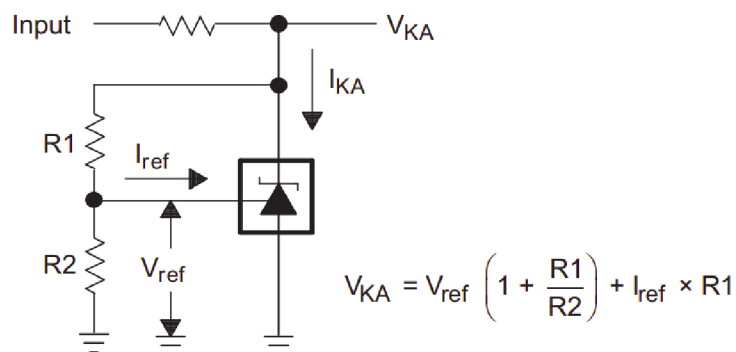
- Obvod by měl obsahovat i spínací výkonový prvek (MOSFET).

- Pracovní frekvence by měla být co nejvyšší, ideálně rozmítaná (*spread spectrum*), aby byl zajištěn dostatečný odstup od zvukového pásma a nízké rušení.
- Obvod musí být schopný pracovat s výstupním napětím 48 V.
- Napájecí napětí zařízení musí být v rozsahu vstupního napětí obvodu.

Jako zcela nevhodné se jevíly obvody pro měniče DC/DC s vyšším výstupním výkonem, např. LM2577, LM2586, MIC2172. Ty totiž, dle zkušeností vedoucího práce, při nízkém zatížení vynechávají spínací cykly ze své už tak poměrně nízké pracovní frekvence. Jsou sice hojně dostupné a levné, ale s malou zátěží pak silně ruší zvukové pásmo. Podstatná byla rovněž skupina obvodů s rozmítanou spínací frekvencí, tzv. *spread spectrum*. Ty svůj pracovní kmitočet pseudonáhodně rozmítají, což výsledné rušení rozloží do širšího pásma bez výrazných maxim. Žádný z těchto obvodů, který by dokázal pracovat s výstupním napětím 48 V však nebyl v době výběru součástek dostupný.

Poslední možností tak zůstaly obvody s vysokou spínací frekvencí (stovky kHz a více), ze kterých byl nakonec zvolen obvod LM5001 od společnosti Texas Instruments. Ten splňuje všechny hlavní požadavky a umožňuje nastavovat pracovní frekvenci až do 1,5 MHz.

Předpětí mikrofону tvoří stejnosměrné napětí se sériovým rezistorem, což je popsáno v části 1.1. Maximální odběr z tohoto předpětí je dle přílohy 4 v doporučení ITU [1] asi 500 μ A. Pro vytvoření předpětí byl zvolen velmi dostupný a levný obvod TL431. Ten funguje jako programovatelná Zenerova dioda. Volbou poměru děliče tvořeného rezistory R1 a R2 určíme výstupní napětí obvodu.



Obr. 1.7: Zapojení obvodu TL431 [10]

1.3.5 Elektromechanické součástky

Konektory pro nízkofrekvenční signály byly přednostně voleny v montáži THT, aby bylo dosaženo co nejvyšší mechanické odolnosti. Konektory XLR jsou vybrány v provedení s možností přišroubovat čelo konektoru do předního panelu zařízení, pro snížení namáhání DPS při připojování/odpojování konektorů. Konektory XLR nemají pojistné západky, protože se neočekává výraznější manipulace se zařízením v průběhu jeho používání.

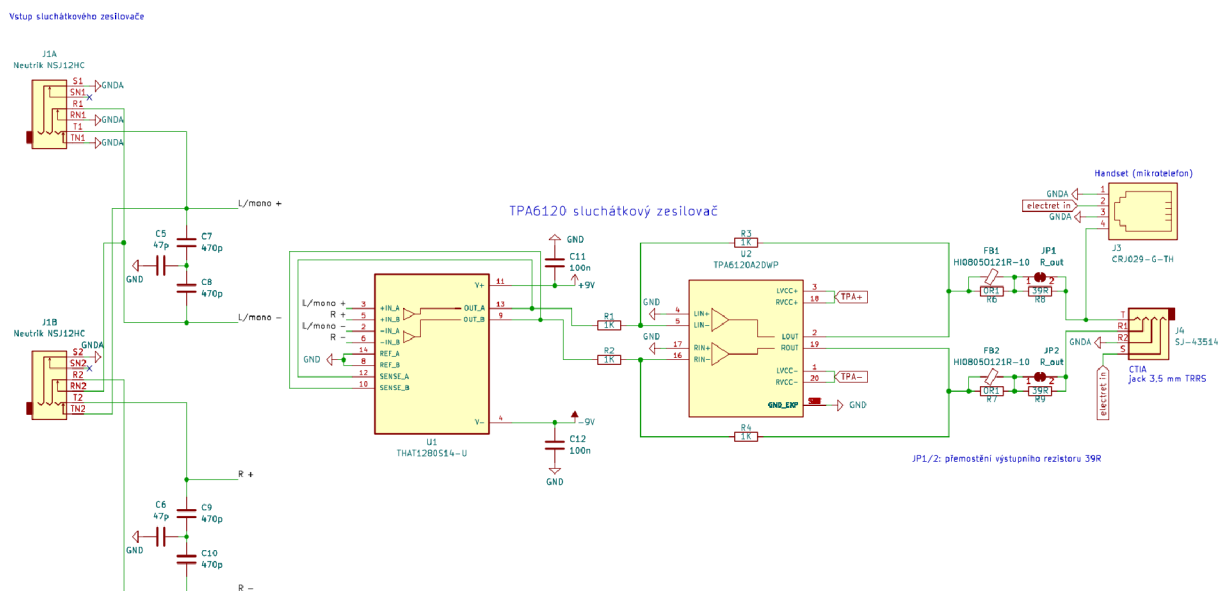
Napájecí konektor musí obsahovat rozepínací kontakt, který odpojí jeden pól baterie při zasunutí konektoru z externího adaptéru. Spínače pro volbu mikrofonního vstupu a pro zapnutí fantomového napájení nepracují s velkými proudy ani napětími, jsou proto voleny miniaturní posuvné přepínače v THT montáži.

Krabička, do které je celé zařízení umístěno musí být kovová. Jako nejvhodnější se jeví hliníkové krabičky od firmy Hammond Manufacturing, která má širokou nabídku krabiček a pouzder pro elektronická zařízení. Bude použita krabička z hliníkového profilu z řady 1455. Ta umožní pohodlnou montáž DPS zasunutím do žeber profilu a bude snadno obrobitelná – pro vytvoření otvorů a výřezů v předním a zadním panelu zařízení.

2 Výsledky studentské práce

2.1 Návrh nízkofrekvenční části

2.1.1 Sluchátkový zesilovač



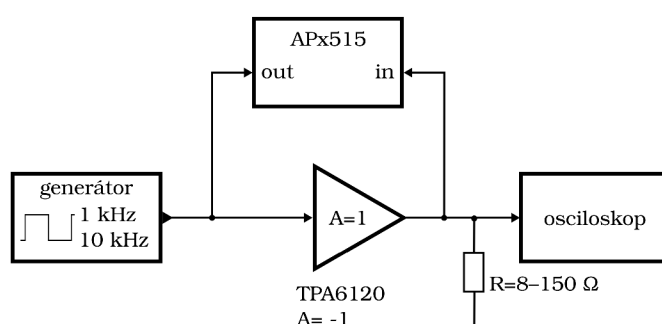
Obr. 2.1: Schéma sluchátkového zesilovače

Vstup zesilovače je tvořen konektorem J1, jehož přepínací kontakty zajišťují, aby při použití pouze zdířky J1A pracovaly oba kanály zesilovače paralelně, monofonně. Při odpojení konektorů jsou vstupy zkratovány na zem. Po konzultaci s vedoucím práce byly původně plánované konektory XLR-TRS Combo zaměněny za dvojitý konektor TRS Jack, z důvodu nedostatku místa na předním panelu zařízení. Kondenzátory C5–C10 chrání vstup linkového přijímače U1 před pronikáním vysokofrekvenčního rušení. Na doporučení výrobce je použito zapojení, kdy uzel kondenzátorů o velikosti 470 pF není připojen přímo na zem. Toto zapojení snižuje vliv případné odchylky hodnot kondenzátorů, protože se na celkové impedanci sériové kombinace (ze signálové linky na zem) podílí výrazně méně než kondenzátor, který je společný oběma signálovým linkám. [9]

Obvod U1 je v katalogovém zapojení. Jeho zesílení je jednotkové a nelze jej měnit, přesné rezistory které jej mění jsou vytvořeny přímo na křemíkovém čipu obvodu. Jiných hodnot zesílení lze dosáhnout pouze výměnou za jiný integrovaný obvod z řady THAT 128x. Napájecí vstupy jsou dle doporučení výrobce blokovány keramickými kondenzátory 100 nF (C11 a C12).

Integrovaný obvod U2 je zapojen jako invertující zesilovač s jednotkovým zesílením. To je určeno pomocí rezistorů R1–R4. Rezistory R3 a R4 umístěné ve zpětné vazbě obvodu mají doporučenou hodnotu $1\text{ k}\Omega$, která poskytuje nejlepší stabilitu zisku obvodu při zachování dobré šířky pásma. [4]

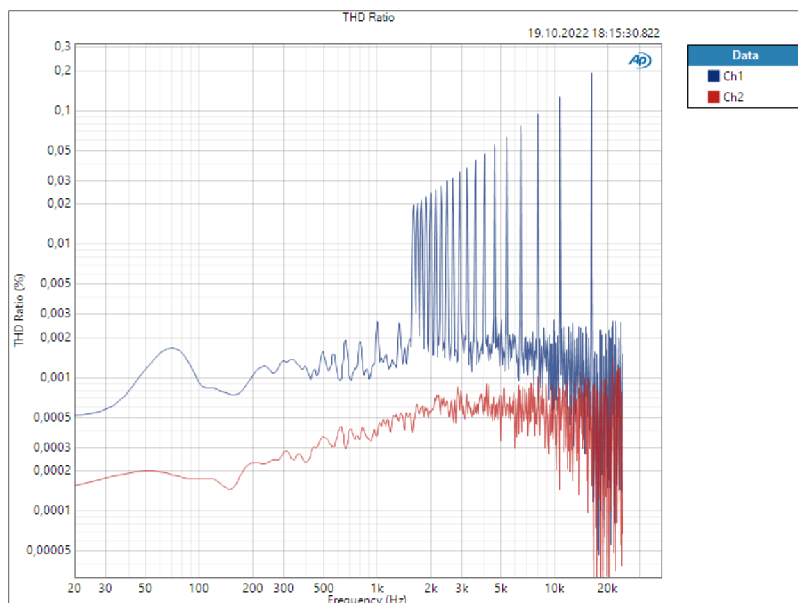
Na výstup obvodu nejsou připojeny rezistory o doporučené hodnotě $39,2\ \Omega$. Obvod byl zapojen na kontaktním poli jako jednotkový invertující zesilovač a bylo provedeno měření stability. Při něm byl obvod buzen obdélníkovým signálem o frekvenci 1 a 10 kHz. Ani při hodnotě sériového rezistoru $0,1\ \Omega$ nevznikaly na náběžných a sestupných hranách výstupního signálu výrazné překmity a zesilovač byl stabilní při odporovém zatížení $8\text{--}150\ \Omega$, včetně paralelně připojené kapacitní zátěže v řádu desítek nF.



Obr. 2.2: Zapojení při měření stability zesilovače TPA6120

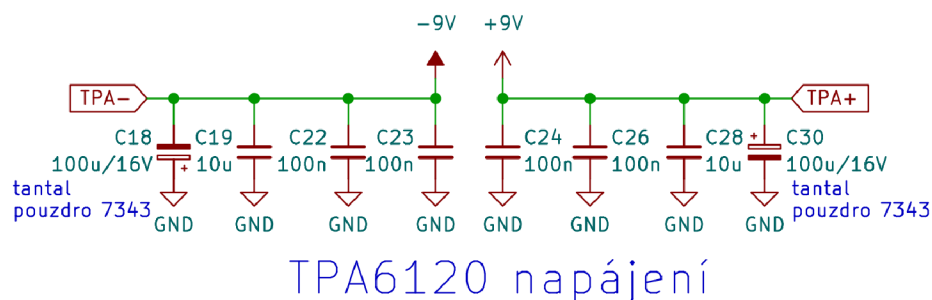
Na závěr bylo provedeno měření pomocí analyzátoru Audio Precision APx515. Jako zátěž byla použita dynamická sluchátka AKG K66 se jmenovitou impedancí $32\ \Omega$. V pozdějším návrhu jsou rovněž k výstupním rezistorům zařazeny paralelní feritové korálky FB1 a 2, které dále zamezují vzniku vf oscilací a pronikání rušení (např. indukovaného na kabelech ke sluchátkům) do zpětné vazby zesilovače. Pokud by se v budoucnu projevila nestabilita zesilovače, je možné rozpojením zkratovacích propojek zařadit rezistory $39,2\ \Omega$ zpět do obvodu. Zesílení však bude silně závislé na zatížení zesilovače.

Na začátku měření působil problém napájecí zdroj s nábojovou pumpou, který pracoval na frekvenci cca 25 kHz a způsoboval ostré špičky ve zkreslení zesilovače. Připojením kondenzátoru 5 pF mezi vývody 7 a 2 nábojové pumpy LT1054 se její pracovní frekvence zvýšila na asi 100 kHz (frekvence se se vstupním napětím i teplotou mění, ale je mimo zvukové pásmo), což špičky ve zkreslení eliminovalo. S touto úpravou celkové harmonické zkreslení zesilovače (zapojeného pouze na kontaktním poli, které má velké parazitní jevy) nepřesáhlo $0,05\ \%$.



Obr. 2.3: Špičky zkreslení způsobené nábojovou pumpou

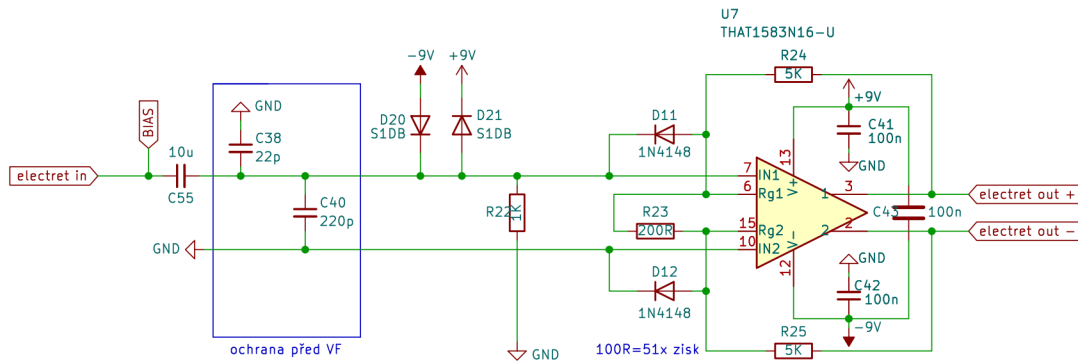
Ošetření napájecích vstupů zesilovače je velmi důležité a pro přehlednost bylo umístěno do jiného listu schématu.



Obr. 2.4: Napájení obvodu TPA6120

Keramické kondenzátory C23 a C24 jsou umístěny co nejbližší napájecím vývodům integrovaného obvodu s co nejkratšími přívodními vodiči. Ostatní kondenzátory mohou být umístěny ve větší vzdálenosti. Tantalové kondenzátory C18 a C30 tvoří hlavní zásobu energie pro pokrytí dynamických špiček zesilovaného signálu. Různá velikost pouzder kondenzátorů (tedy různá charakteristika jejich impedance) napomáhá lepší filtraci rušení.

2.1.2 Mikrofonní předzesilovače

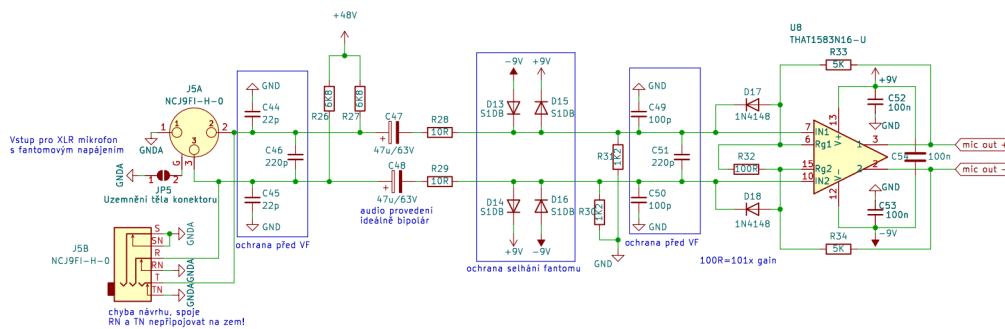


Obr. 2.5: Schéma předzesilovače elektretového mikrofonu

Na vstup předzesilovače pro elektretový mikrofon je přivedeno stejnosměrné předpětí dle doporučení ITU. Jeho přítomnost na vstupu předzesilovače je ale nežádoucí, proto je blokováno kondenzátorem C55. Kondenzátory C38 a C40 chrání vstup před pronikáním rušivých vysokofrekvenčních signálů. Rezistor R22 poskytuje zátěž pro předzesilovač při odpojeném vstupu a tvoří jeho vstupní impedanci. Jeho hodnota je kompromisní, protože vyšší hodnoty rezistoru by na vstup vnášely nezanedbatelný tepelný šum. Diody D11 a D12 mají ochrannou funkci. Zesílení použitého předzesilovače je určeno dle vztahu:

$$A_U = 1 + \frac{R_A + R_B}{R_G} [-], \quad (2.1)$$

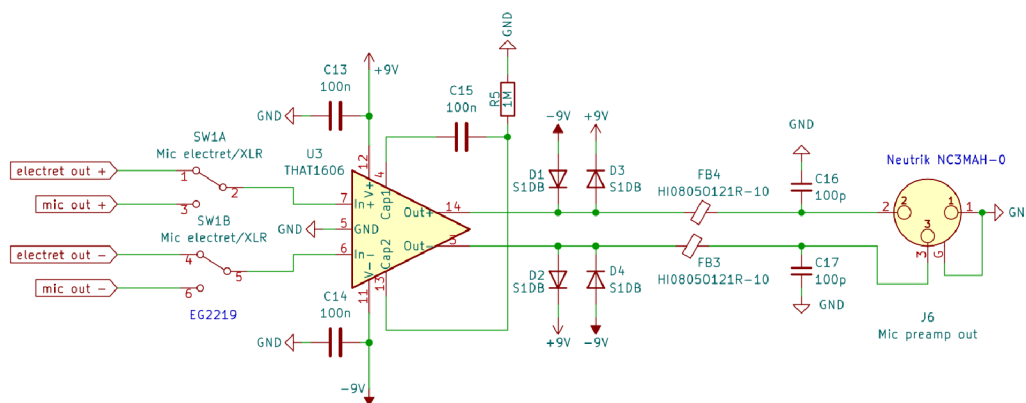
kde R_A a R_B jsou rezistory R24 a R25; R_G rezistor R23 [7]. Předzesilovač má tedy napěťový zisk 51, což je zesílení přibližně 34,2 dB. Následně zařazený linkový budič má zesílení 6 dB, čímž je dosaženo celkového zesílení 40 dB. Napájecí vstupy integrovaného obvodu jsou opatřeny keramickými blokovacími kondenzátory C41–C43, které by měly být umístěny co nejbližší k pouzdru. Diody D11 a D12 tvoří cestu (mimo vstupy obvodu) pro proud při přetížení předzesilovače.



Obr. 2.6: Schéma předzesilovače XLR mikrofonu

Signál z mikrofonu je přiveden na kombinovanou zásuvku XLR-TRS Combo. V návrhu schématu je chyba – přepínací kontakty konektoru TRS jsou uzemněny, což v případě použití XLR konektoru uzemní vstupy zesilovače. Tato chyba byla vyřešena odstráněním odpovídajících vývodů před zapájením konektoru do desky. Problematické může být také připojení konektoru Jack na fantomové napájení, vhodnější by bylo jej připojit až za kondenzátory C47 a C48. Co nejbliže ke konektoru je umístěn filtr proti vysokofrekvenčnímu rušení, tvořený kondenzátory C44–C46. Fantomové napájení P48 dle normy IEC [2] je připojeno přes rezistory R26 a R27 o předepsané hodnotě 6,8 kΩ. Kondenzátory C47 a C48 zabraňují průchodu fantomového napájení na vstup předzesilovače. Diody D13–D16 společně s rezistory R28 a R29 chrání vstupy předzesilovače před přetížením při selhání oddělovacích kondenzátorů fantomového napájení. Zbývající součásti tohoto předzesilovače jsou stejné jako u druhého předzesilovače.

2.1.3 Linkový budič

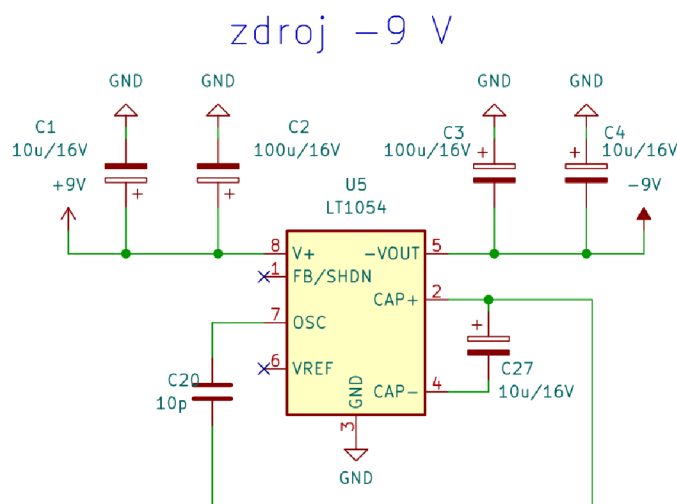


Obr. 2.7: Schéma linkového budiče

Před vstupem linkového budiče je zařazen dvoupólový přepínač SW1, kterým uživatel volí, jaký mikrofonní předzesilovač bude aktivní, resp. který ze signálů bude přiveden na výstup zařízení. Linkový budič U3 je zapojen dle doporučení výrobce. Diody D1–D4 chrání výstup měniče před přepětím např. v případě že by na výstup bylo omylem připojeno fantomové napájení. Feritové korálky FB3 a FB4 společně s kondenzátory C16 a C17 zamezují průniku vysokofrekvenčního rušení. Výstup je realizován zástrčkou XLR. Linkový budič má zesílení 6 dB, což bylo nutné zohlednit při návrhu mikrofonních předzesilovačů, aby bylo dosaženo celkového zesílení 40 dB.

2.2 Návrh napájecích zdrojů

2.2.1 Hlavní zdroj $\pm 9\text{ V}$



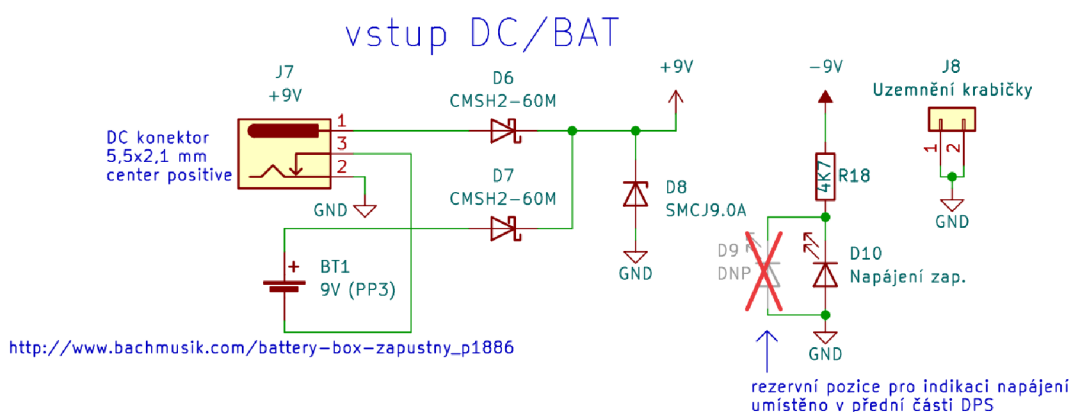
Obr. 2.8: Schéma invertující nábojové pumpy

Stejnoseměrné napájecí napětí 9 V z baterie nebo adaptéru je přivedeno na vstup obvodu LT1054. Ta jej (s malým úbytkem napětí) invertuje. Kondenzátory C1–C4 filtrují napětí na kladné a záporné napájecí větvi. Kondenzátor C27 tvoří pracovní kapacitu nábojové pumpy U5. Pracovní frekvence je pomocí kondenzátoru C20 zvýšena na asi 100 kHz, což se při testování sluchátkového zesilovače ukázalo jako nutné, jinak generuje rušení, které proniká do zvukového pásma. Přesnou hodnotu kapacity bylo nutné určit experimentálně, jelikož pracovní frekvence je závislá i na zatížení nábojové pumpy. Nábojová pumpa je podle informací výrobce schopná dodat proud až 100 mA, při kterém je na ní úbytek 1,1 V. Takového odběru by však zařízení nemělo dosahovat. Nejvyšší klidový odběr jednotlivých obvodů zařízení by měl být následující:

Tab. 2.1: Odhad klidového odběru zařízení

Zařízení	odběr [mA]
TPA6120 (2 kanály)	14+14
THAT 1583 (2x)	10+10
THAT 1280	8
THAT 1606	5,75
LT1054	5
LT8362	1,6
Ostatní obvody odhad	max. 10
Celkem	78,4

Tento klidový odběr je vypočítán z maximálních hodnot uváděných výrobcí, je proto velmi nepravděpodobné, že bude zařízení skutečně mít takovýto klidový odběr. Hodnota odběru z nábojové pumpy bude, při předpokladu že obě napájecí větve jsou zatíženy stejně, poloviční.



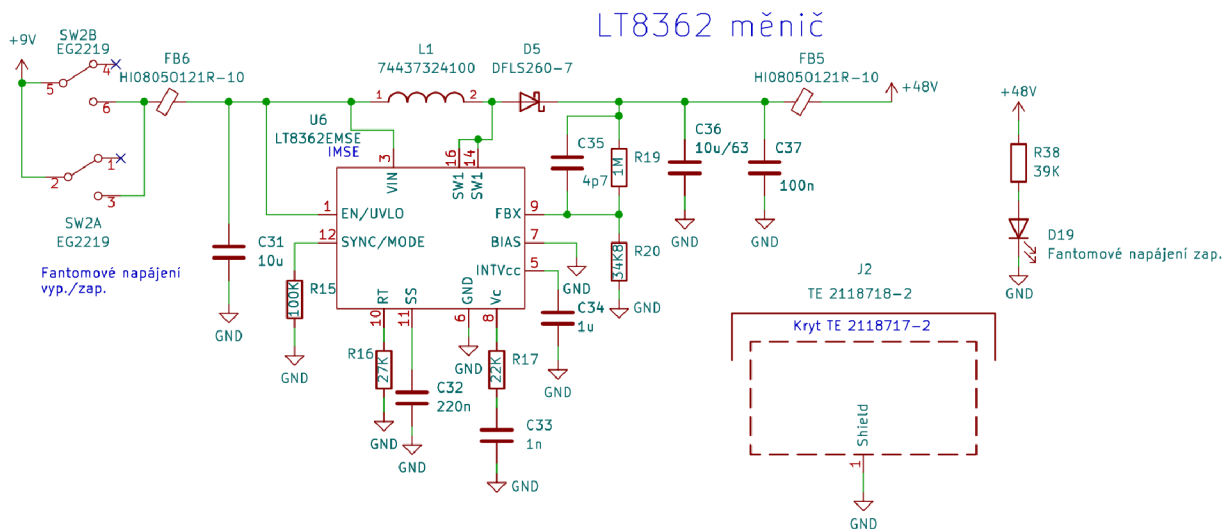
Obr. 2.9: Vstupní obvody napájení

Zařízení může být napájeno buď ze stejnosměrného zdroje, který je připojen do zásuvky J7 nebo ze standardní devítivoltové baterie BT1. Pokud je do konektoru J7 připojena zástrčka, rozeptne se kontakt mezi vývody 2 a 3, což odpojí záporný pól baterie z obvodu. Pokud by kontakt selhal, baterie i adaptér jsou odděleny pomocí Schottkyho diod D6 a D7, které zabrání toku proudu z adaptéru do baterie a naopak. Jednosměrný transil D8 plní dvě funkce – chrání obvod před napětím vyšším než je jeho jmenovité napětí (10 V) a také funguje jako ochrana proti přepólování. Indikační dioda D10 slouží jako indikátor zapnutí zařízení. Je zapojena na záporné napájecí větvi, aby případně dokázala indikovat její selhání. Její předřadný rezistor má poměrně velký odpor, protože bude použita vysoce svítivá LED, ale provozovaná při nízkém proudu. Pro červenou LED s obvyklým úbytkem napětí 2 V bude proud

asi 1,5 mA. Redundantní pozice pro diodu D10 je nachystána v přední části DPS, jelikož v době návrhu nebylo rozhodnuto zda bude LED umístěna na předním nebo zadním panelu zařízení. Pro připojení baterie a přídatného uzemnění krabičky jsou použity konektory Molex KK 254. [21]

2.2.2 Měnič pro fantomové napájení 48 V

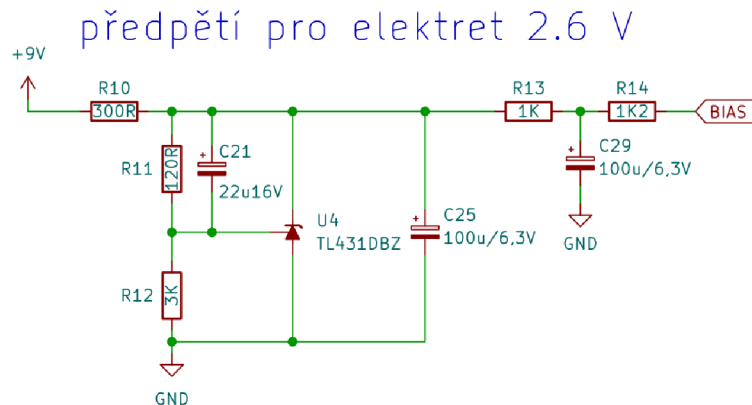
Zvyšující měnič pro vytvoření fantomového napájení mikrofonu byl při návrhu zařízení největší neznámou. V teoretickém úvodu byl jako nejvhodnější zvolen v té době dostupný obvod LM5001. V průběhu návrhu zařízení však byl naskladněn obvod LT8362, který má dobře zdokumentované použití právě ve zdroji 48 V pro napájení mikrofonu [12]. Byla proto zvolena varianta s tímto integrovaným obvodem.



Obr. 2.10: Měnič s obvodem LT8362

Parametry nejdůležitějších součástek druhého měniče byly navrženy pomocí programu LTpowerCAD®, poskytovaném výrobcem obvodu LT8362. [16] Tak je zajištěna stabilita zpětné vazby obvodu a nepřekročení jeho mezních hodnot. Dělič tvořený rezistory R19 a R20 poskytuje zpětnovazební napětí 1,6 V. Při konstrukci byla pro rezistor R20 použita hodnota 36 k Ω dostupná z řady E24. Výsledné výstupní napětí je tedy o něco nižší než 48 V, ale stále v toleranci ± 4 V. Rezistory R17 nastavuje pracovní frekvenci obvodu na 2 MHz. Ta však není statická, protože pomocí rezistoru R15 je obvod nastaven do režimu rozmítané spínací frekvence a při nízkých odběrech pracuje v tzv. *burst* režimu. [18] Měnič je opět umístěn do stínící krabičky a na jeho vstup a výstup jsou zařazeny feritové perly pro snížení pronikání vysokofrekvenčního rušení především do citlivých mikrofonních předzesilovačů.

2.2.3 Zdroj předpětí 2,6 V



Obr. 2.11: Zdroj předpětí s TL431

Obvod TL431 funguje jako programovatelná Zenerova dioda a snaží se na svém referenčním vstupu držet napětí 2,495 V. Pomocí děliče tvořeného rezistory R11 a R12 je tohoto napětí dosaženo právě tehdy, když je mezi katodou a anodou obvodu potřebné napětí 2,6 V. Rezistor R10 omezuje maximální proud, který regulátorem může téct. Kondenzátor C21 výrazně snižuje výstupní šum regulátoru. [19] To je podstatné, protože jakýkoli šum na předpětí mikrofonu bude zesílen mikrofonním předzesilovačem. Výstupní kondenzátor C25 je volen dostatečně velký, aby byly splněny podmínky stability uvedené v katalogovém listu obvodu. [10] Rezistory R13 a R14 tvoří sériový odpor předpětí požadovaný normou ITU. Kondenzátor C29 společně s R13 tvoří horní propust s mezní frekvencí cca 1,6 Hz, která dále napomáhá filtraci předpětí.

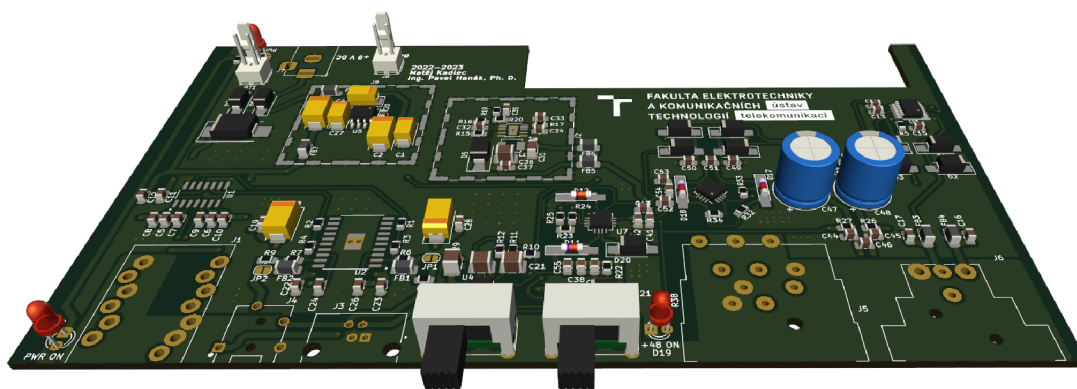
2.3 Návrh DPS

Návrh DPS byl, stejně jako schémata, vytvořen pomocí programu KiCAD. Deska je provedena jako dvouvrstvá s prokovením, preferována je montáž SMD, s výjimkou větších, převážně elektromechanických součástek. Při návrhu bylo postupováno dle znalostí nabytých v předmětu BPC-KEZ a dle zkušeností autora i vedoucího práce. Jednotlivé součástky byly seskupeny do funkčních bloků s důrazem na umístění citlivých nízkofrekvenčních obvodů co nejdále od napájecích zdrojů. Konektory a ovládací prvky jsou umístěny v přední části zařízení a logicky rozmístěny pro zajištění komfortu obsluhy. Napájecí konektor, indikační LED napájení jsou umístěny na zadním panelu. V zadní části DPS je vytvořen výřez do něhož bude zasahovat bateriový box umístěný rovněž na zadním panelu.

Jako první byly vytvořeny spoje v rámci jednotlivých funkčních bloků. Linkové obvody a sluchátkový zesilovač mají poměrně velké množství vývodů nezapojených, nevznikaly tudíž problémy s křížením jednotlivých cest. Mikrofonní předzesilovače s pouzdry QFN však vyžadovaly pečlivé rozmístění součástek včetně jejich natočení v neortogonálních úhlech 45°. Rozmístění součástek v okolí zvyšujícího měniče pro fantomové napájení bylo v maximální míře převzato z dokumentace výrobce, jelikož je tento obvod na rozmístění součástek poměrně citlivý. [18] Cesty mezi spínacím prvkem a pracovní indukčností musí být dostatečně široké aby dokázaly přenést vysoké pulsní proudy a zároveň co nejkratší, aby nevznikaly nežádoucí vazby.

Symetrická vedení signálů od vstupních a k výstupním konektorům jsou provedena tak, aby byly vodiče co nejbližší k sobě a minimalizovala se vazba nežádoucích signálů. U THT součástek jsou preferovány silnější přívodní cesty o šířce 1 mm. Ostatní cesty mají tloušťku 0,3 mm. Napájecí vedení a dlouhé spoje napříč deskou jsou realizovány ve spodní měděné vrstvě. Deska obsahuje dvě zemnicí plochy, jednu hlavní pro většinu desky a jednu v přední části, určenou pro konektory. Ta je ve schématu označena symbolem GNDA a spojena s hlavním uzemněním pomocí zkratovací propojky.

Pájecí plošky pro součástky byly přednostně voleny z knihovny HandSoldering obsažené v knihovně programu KiCAD. Ta je uzpůsobena pro ruční pájení SMD součástek klasickou hrotovou páječkou. U miniaturních pouzder QFN byly plošky prodlouženy, aby bylo možné pouzdra zapájet ručně. Rovněž byly zvětšeny průměry prokůvů v chladicích ploškách integrovaných obvodů, aby byl zlepšen přenos tepla z hrotu páječky.



Obr. 2.12: 3D model navržené DPS

2.4 Konstrukce zařízení

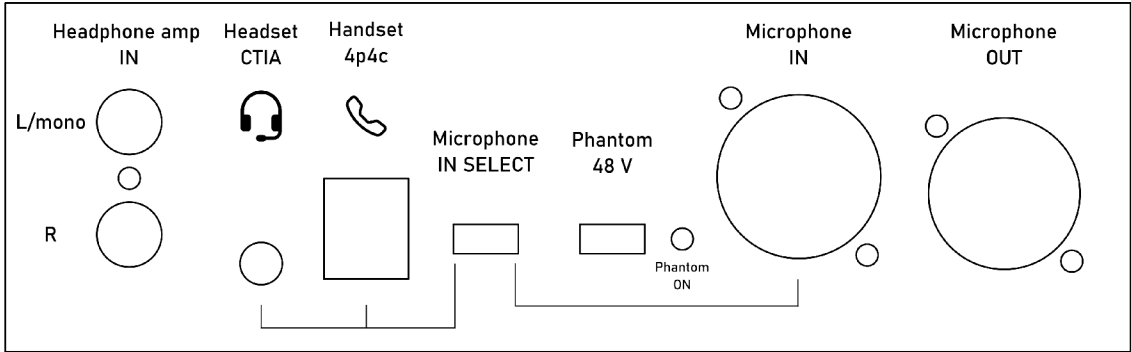
DPS byla vyrobena dle návrhu společností JLCPCB a následně ručně osazena součástkami, postupně od nejmenších integrovaných obvodů až po THT konektory v přední části desky.

Pro zařízení byla vybrána hliníková krabička Hammond 1455T2201. [20] Ta určuje šířku desky 160 mm, která bude zasunuta do žeber profilu krabičky. Profil nemá původní délku a při konstrukci byl zkrácen frézováním na délku 85 mm. Je však vždy nutno počítat s přesahem DPS i za délku profilu, jelikož jej plastové rámečky okolo panelů prodlužují. Deska by v krabičce měla mít minimální vůli. Kompletní fixaci desky v krabičce zajistí přišroubování konektorů do předního panelu.

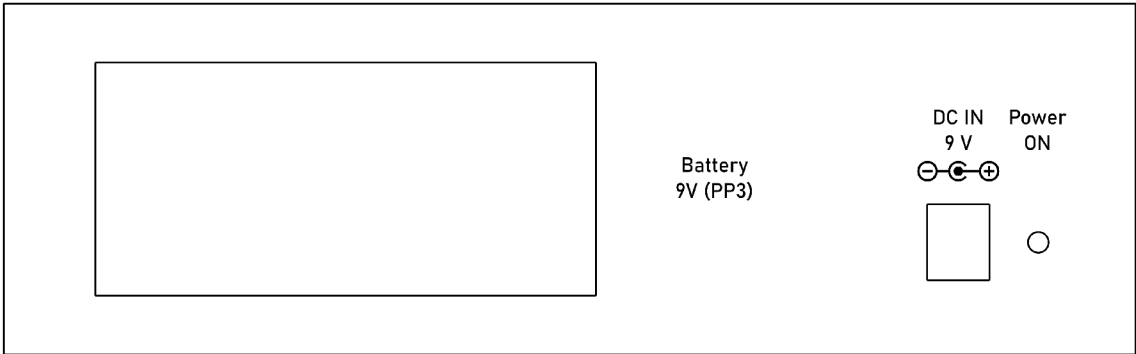


Obr. 2.13: Fotografie hotového zařízení v krabičce

Do předního i zadního panelu krabičky bylo nutné zhotovit otvory pro jednotlivé ovládací prvky a konektory přesahující okraj desky. Rozteče otvorů byly určeny podle rozmístění součástek na DPS v prostředí programu KiCAD a následně přeneseny do programu FreeCAD a s pomocí technických výkresů poskytovaných výrobcí součástek byl vytvořen návrh předního panelu. Ten byl poté exportován do formátu `.dxf` pro CNC frézku, kterou byly panely obrobena. Tento soubor zároveň posloužil pro vytvoření popisů panelů, na což byl použit vektorový grafický editor Inkscape. K jednotlivým prvkům na předním panelu byly přidány stručné popisy jejich funkcí, u konektorů pro headset a mikrotelefon pak byly doplněny i piktogramem. Užito je bezpatkové písmo *Bahnschrift* vycházející z písma DIN 1451, pro správné zobrazení souborů v elektronické příloze je nutné mít toto písmo nainstalováno. Obdobně byly vytvořeny i popisy zadního panelu, kde byl použit piktogram pro znázornění polarity napájecího konektoru. Pro větší názornost bude zařízení na vrchní straně krabičky opatřeno také blokovým schématem popisujícím funkci a podrobnější parametry jeho jednotlivých částí.



Obr. 2.14: Návrh popisů předního panelu



Obr. 2.15: Návrh popisů zadního panelu

2.5 Měření

K měření byl použit audio analyzátor Audio Precision APx525 s přidruženým softwarem pro sérii přístrojů řady APx 5xx běžícím na PC. Analyzátor umožňuje snadné automatizované měření nejdůležitějších parametrů nízkofrekvenčních zařízení, např. frekvenční odezvy, harmonického zkreslení apod. Je také možné tyto parametry měřit plynulým nebo krokovým rozmítáním budicí frekvence nebo úrovně. Měření všech funkčních bloků zahrnuje tyto parametry:

Tab. 2.2: Společné měřené parametry

Parametr	Poznámka	Jednotka
Max. vstupní napětí	pro zkreslení 1 %, 1 kHz	mV RMS
Max. výstupní napětí	pro zkreslení 1 %, 1 kHz	V RMS
SNR	vstupní úroveň pod limitem zkreslení, 1 kHz	dB
Modulová kmitočtová charakteristika	vstupní úroveň pod limitem zkreslení, 20 Hz–80 kHz	Hz, dB
Závislost zesílení na vstupní úrovni (krokování úrovně)	1 kHz, úroveň do limitu zkreslení	mV RMS, dB
Závislost THD+N na vstupní úrovni (krokování úrovně)	1 kHz, úroveň do limitu zkreslení	mV RMS, %
Závislost THD+N na frekvenci (krokování frekvence)	vstupní úroveň pod limitem zkreslení, 20 Hz–80 kHz	Hz, %

Další parametry, specifické pro některé z jednotlivých funkčních bloků, jsou uvedeny v příslušné sekci výsledků měření, např. přeslechy mezi kanály u stereofonního sluchátkového zesilovače apod. Bylo rovněž provedeno měření bez připojeného zařízení, kdy byl analyzátor APx525 nastaven na režim *Loopback*, kdy je budicí výstup interně připojen na měřicí vstup analyzátoru. Tak byly stanoveny nejnižší možné relevantní hodnoty jednotlivých parametrů. Změřeny byly následující hodnoty:

Tab. 2.3: Parametry analyzátoru APx525

Parametr	Hodnota
THD+N (20 Hz–80 kHz, 100 mV)	<0,005 %
THD+N (1 kHz, 1 mV–1 V)	<0,05 %
Chyba přenosu (20 Hz–80 kHz, 100 mV)	+0,01; –0,04 dB

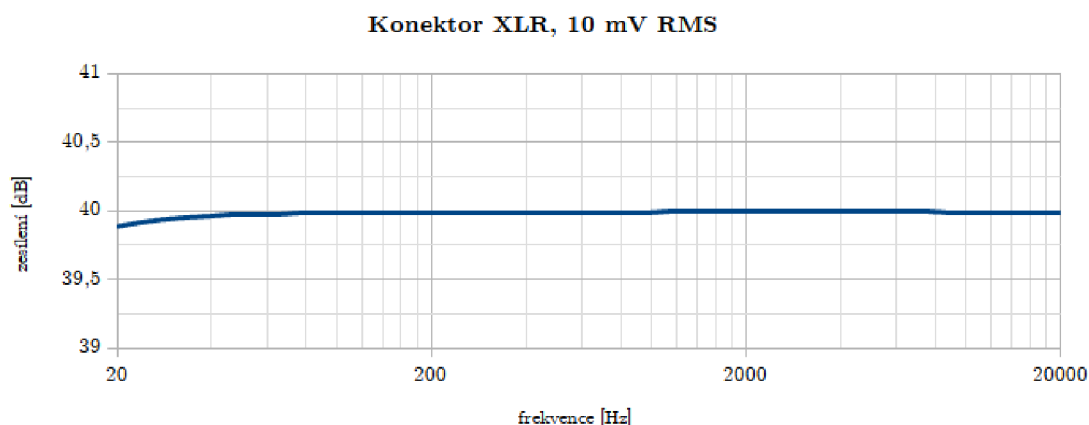
2.5.1 Symetrický mikrofonní předzesilovač

Předzesilovač je navržen pro zisk 40 dB, tedy napěťové zesílení 100. Zvlnění kmitočtové charakteristiky předzesilovače dle zadání musí být maximálně 1 dB v pásmu 20 Hz–20 kHz. Fantomové napájení by mělo mít napětí $48\text{ V} \pm 4\text{ V}$. Měření bylo provedeno jak pro XLR tak TRS konektor, výsledky jsou ale téměř identické, jelikož konektory jsou v zařízení zapojeny paralelně. Pro přehlednost je uveden výsledek měření pro vstupní konektor XLR, soubory z měření pro konektor TRS jsou obsaženy v příloze. Změřené parametry symetrického mikrofonního předzesilovače, stanovené na začátku této kapitoly, jsou následující:

Tab. 2.4: Parametry symetrického mikrofonního předzesilovače

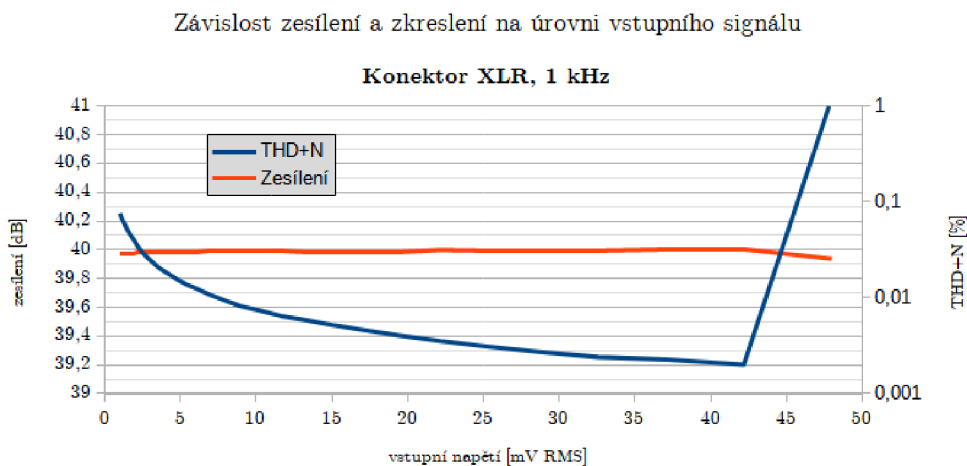
Parametr	Hodnota
Max. vstupní napětí	48 mV
Max. výstupní napětí	4,771 V
SNR	88,2 dB
CMRR 1 kHz, 10 mV	53,6 dB
Napájecí (fantomové) napětí	46,25 V

Kmitočtová charakteristika symetrického mikrofonního předzesilovače



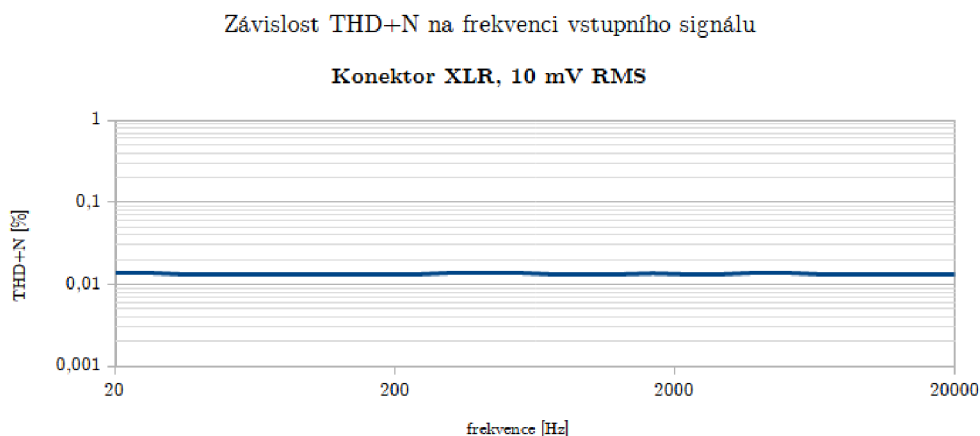
Obr. 2.16: Kmitočtová charakteristika symetrického mikrofonního předzesilovače

Z grafu je patrné, že je splněna podmínka pro zvlnění kmitočtové charakteristiky, které by ve slyšitelném pásmu nemělo překročit 1 dB. Pod kmitočtem 40 Hz dochází k poklesu přenosu předzesilovače, jedná se však nejvýše o desetiny dB.



Obr. 2.17: Závislost zesílení a zkreslení symetrického mikrofonního předzesilovače na vstupní úrovni

Zesílení je v pracovním pásmu předzesilovače téměř konstantní, s maximální odchylkou as 0,1 dB. Zkreslení se započtením šumu s rostoucí vstupní úrovní klesá, což je logické, jelikož se zvětšuje odstup užitečného signálu od šumu. THD+N nepřekročí při vstupní úrovni 1–48 mV hodnotu 0,1 %. Poslední datový bod odpovídá maximálnímu vstupnímu napětí, kdy zkreslení přesáhne hodnotu 1 %.



Obr. 2.18: Závislost zkreslení symetrického mikrofonního předzesilovače na frekvenci

THD+N nevykazuje žádnou pozorovatelnou závislost na frekvenci vstupního signálu, což je žádoucí. Hodnota zkreslení je v pásmu 20 Hz–20 kHz téměř konstantní, mírně vyšší než 0,01 %.

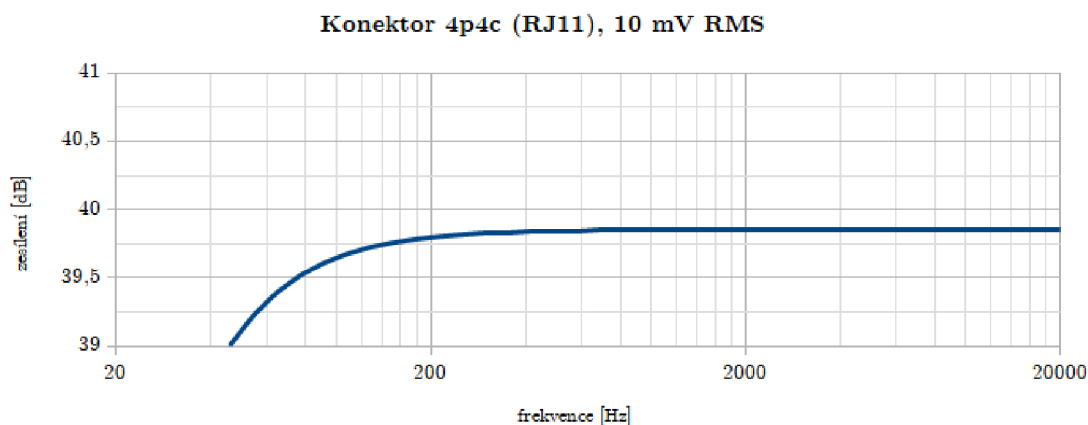
2.5.2 Nesymetrický mikrofonní předzesilovač

Nesymetrický mikrofonní předzesilovač je, stejně jako symetrický předzesilovač, navržen pro zesílení 40 dB. Měření bylo provedeno při připojení budicího signálu na konektor 4p4c (označovaný také jako telefonní konektor RJ11, ale se zapojenými čtyřmi vodiči). Požadavek na zvlnění je stejný jako u symetrického předzesilovače – max. 1 dB v pásmu 20 Hz–20 kHz. Na „živý“ vstup předzesilovače musí být přivedeno napájecí stejnosměrné napětí $2,6\text{ V} \pm 1\%$.

Tab. 2.5: Parametry nesymetrického mikrofonního předzesilovače

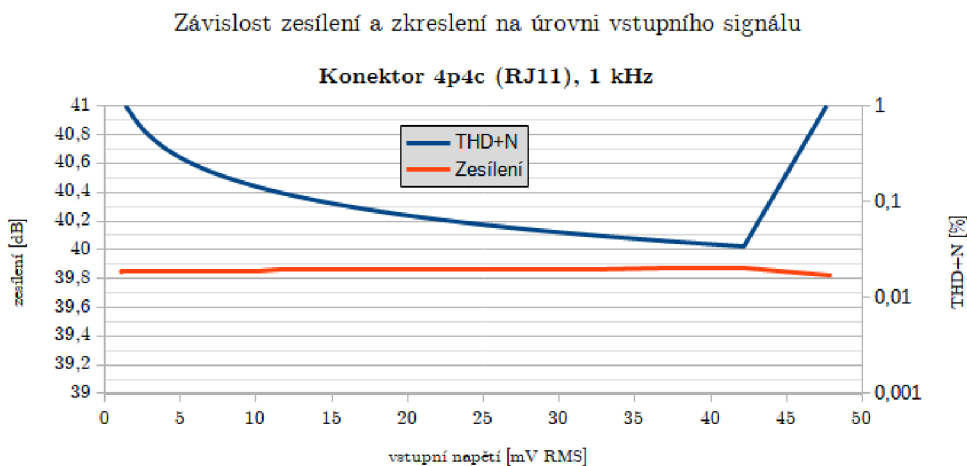
Parametr	Hodnota
Max. vstupní napětí	48,3 mV
Max. výstupní napětí	4,71 V
SNR	69,6 dB
Napájecí napětí (bias)	2,596 V

Kmitočtová charakteristika nesymetrického mikrofonního předzesilovače



Obr. 2.19: Kmitočtová charakteristika nesymetrického mikrofonního předzesilovače

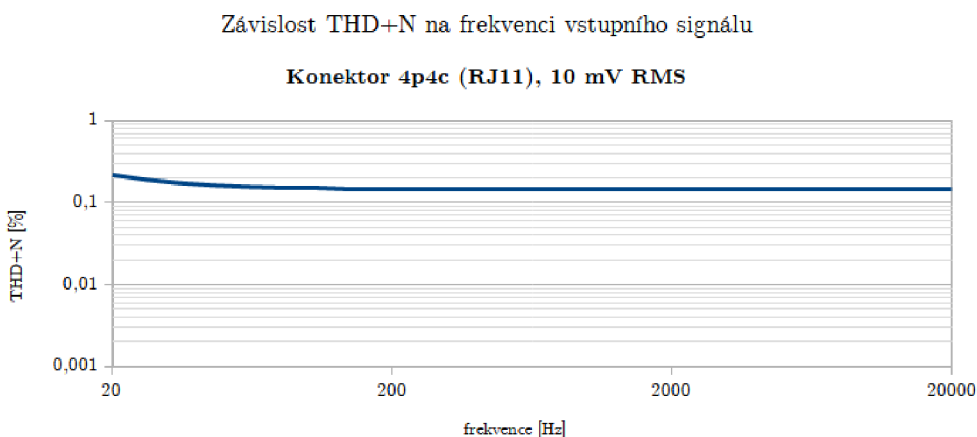
Z grafu je patrné, že podmínka pro zvlnění kmitočtové charakteristiky, které by ve slyšitelném pásmu nemělo překročit 1 dB, je splněna pouze částečně. Pod kmitočtem asi 50 Hz dochází k poklesu přenosu předzesilovače pod 39 dB, což je způsobeno nedostatečnou kapacitou kondenzátoru C55, který odděluje vstup předzesilovače od stejnosměrného napájecího napětí pro elektretový mikrofon. V této



Obr. 2.20: Závislost zesílení a zkreslení nesymetrického mikrofonního předzesilovače na vstupní úrovni

oblasti kmitočtů se však nenachází užitečné signály lidské řeči, která je mikrofonem komunikátoru obvykle zachycována.

Zesílení předzesilovače je téměř konstantní, avšak asi o 0,15 dB nižší než plánovaných 40 dB. To je nejspíše způsobeno nepřesností rezistoru, který nastavuje zesílení integrovaného obvodu předzesilovače. Tato odchylka je však minimální. THD+N dosahuje při nízkých vstupních úrovních poměrně vysokých hodnot, na kterých se podílí především šum a souhlasné rušení, které u nesymetrického předzesilovače není z principu potlačeno. V oblasti obvyklých úrovní vstupních signálů z elektretových mikrofonů (citlivost obvykle přes 10 mV/Pa) je zkreslení nižší než ~0,2 %.



Obr. 2.21: Závislost zkreslení symetrického mikrofonního předzesilovače na frekvenci

THD+N nevykazuje žádnou výraznější závislost na frekvenci vstupního signálu. Hodnota zkreslení je v pásmu 20 Hz–20 kHz téměř konstantní, asi 0,15 %.

2.5.3 Sluchátkový zesilovač

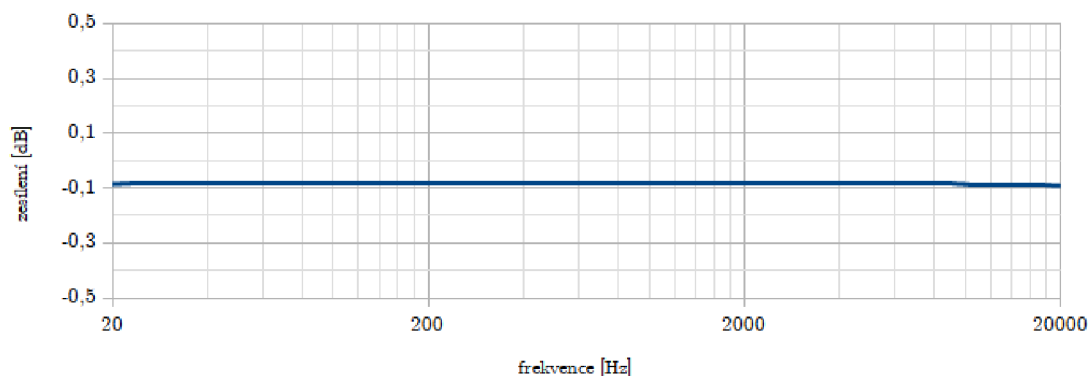
Stereofonní sluchátkový zesilovač je navržen pro jednotkové zesílení (napěťový zesílení 1, zisk 0 dB). Zvlnění kmitočtové charakteristiky zesilovače dle zadání musí být maximálně 0,5 dB v pásmu 20 Hz–20 kHz. Měření, která jsou relevantní pro samostatný kanál zesilovače byly provedeny při připojení budicího signálu do zdíčky L/mono a vstupu analyzátoru do výstupu levého kanálu.

Tab. 2.6: Parametry sluchátkového zesilovače

Parametr	Hodnota
Max. vstupní napětí	2,8 V
Max. výstupní napětí	2,754 V
SNR	78,3 dB
Přeslech 1 kHz, 100 mV	55,1 dB
Přeslech 10 kHz, 100 mV	54,6 dB
CMRR 1 kHz, 100 mV	59,78 dB

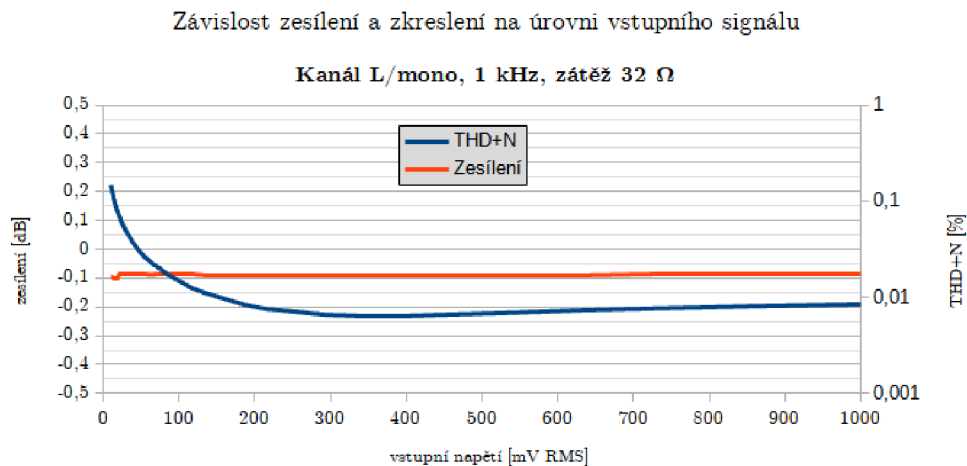
Kmitočtová charakteristika sluchátkového zesilovače

kanál L/mono, 100 mV RMS, zátěž 32 Ω



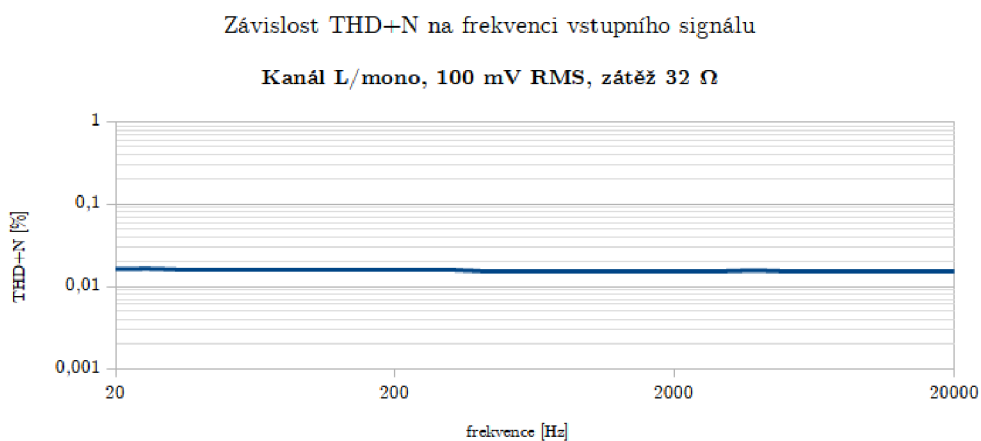
Obr. 2.22: Kmitočtová charakteristika sluchátkového zesilovače

Zesílení je o 0,1 dB nižší než navržené, což je nejspíše způsobeno chybou hodnot rezistorů, které zesílení nastavují. Chyba je však napříč měřeným kmitočtovým pásmem téměř konstantní a nevykazuje žádné větší zvlnění.



Obr. 2.23: Závislost zesílení a zkreslení sluchátkového zesilovače na vstupní úrovni

THD+N nepřesáhne hodnotu asi 0,2 %, zesílení není na vstupní úrovni nijak výrazněji závislé.



Obr. 2.24: Závislost zkreslení sluchátkového zesilovače na frekvenci

Zkreslení zesilovače není na frekvenci budicího signálu pozorovatelně závislé a drží konstantní hodnotu mírně pod 0,02 %.

2.5.4 Zhodnocení měření

Téměř všechny parametry požadované doporučením ITU byly splněny, jelikož nejsou tak přísné jako požadavky zadání práce, které byly splněny s několika výjimkami. Kmitočtová charakteristika nesplňuje toleranční pole ± 1 dB pro celé pásmo 20 Hz–20 kHz, což ale pravděpodobně neovlivní výsledky měření, při kterých bude zařízení používáno, viz příslušná sekce. Hodnoty odstupů signál-šum nejsou špičkové, nicméně jsou naprosto dostačující pro určenou aplikaci zařízení. Obdobně tomu je i u činitele potlačení souhlasného rušení (CMRR). Ten by ale bylo možné zlepšit pečlivějším návrhem desky s fyzicky symetrickým vedením spojů a použitím přesnějších hodnot součástek v cestě symetrického signálu. Výstupní napětí sluchátkového zesilovače by dle doporučení ITU nemělo překročit 150 mV. Toto omezení bylo při požadovaném jednotkovém zesílení obtížné realizovat např. diodovým omezovačem. Pro takovou realizaci by bylo nutné pracovat s vyšším vstupním napětím, to omezit diodami, utlumit a následně přivést na vstup sluchátkového zesilovače. Při jednotkovém zesílení je však jednoduché výstupní úroveň shodná se vstupní, jejíž hodnotu obvykle obsluha zařízení zná a může ovládat.

Závěr

Bakalářská práce ve své teoretické části rozebrala požadavky na měřicí rozhraní pro komunikátory z doporučení ITU-T Rec P.381 a požadavky plynoucí ze zadání práce. Následně byly dle těchto požadavků vybrány konkrétní hlavní součásti jednotlivých funkčních bloků zařízení. Bylo také nutno přihlídnout k dostupnosti vybraných součástí u prodejců. Při výběru součástí byly diskutovány i možné alternativy, např. od jiných výrobců, nebo z podobných produktových řad stejného výrobce. U sluchátkového zesilovače TPA6120 bylo provedeno měření stability a ostatních běžných parametrů, jelikož bude použit v zapojení, které výrobcem není doporučeno.

V praktické části byla nejdříve pomocí programu KiCAD vytvořena elektrická schémata pro jednotlivé funkční bloky zařízení. Důraz byl kladen na přehlednost, schémata jednotlivých bloků jsou proto umístěna na samostatné stránky a bloky jsou popsány. Ve stejném programu byl vytvořen návrh desky plošných spojů s důrazem na oddělení citlivých nízkofrekvenčních částí od možných zdrojů rušení, které by degradovaly parametry výsledného zařízení. Dle návrhy byla vyrobena fyzická DPS a ručně osazena všemi součástkami. Zařízení bylo zabudováno do hliníkové krabičky a byly vytvořeny návrhy popisů ovládacích prvků na předním a zadním panelu zařízení. Bylo provedeno měření důležitých parametrů, jako je kmitočtová charakteristika, zkreslení apod. Parametry požadované zadáním práce i doporučením ITU, ze kterého zadání vycházelo, byly splněny s několika výjimkami, jež jsou popsány ve zhodnocení měření.

Literatura

- [1] ITU-T P.381. *Technical requirements and test methods for the universal wired headset or headphone interface of digital mobile terminals*. 5.0. Geneva: International Telecommunication Union, 2020.
- [2] IEC 61938:2018. *Guide to the recommended characteristics of analogue interfaces to achieve interoperability (GMT)*. 3.0. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018.
- [3] SELF, Douglas. *Small signal audio design*. Oxford: Focal Press, 2010, xvi, 556 s. : il. ISBN 978-0-240-52177-0.
- [4] *TPA6120A2 High Fidelity Headphone Amplifier* [online]. Texas Instruments [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa6120a2.pdf>>
- [5] *Microphone Preamps*. THAT Corporation [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <<https://thatcorp.com/low-noise-preamplifier-ics/>>
- [6] *THAT Corporation 1280-Series Datasheet* [online]. THAT Corporation [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1280-Series_Datasheet.pdf>
- [7] *THAT Corporation 1583 Datasheet* [online]. THAT Corporation [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1583_Datasheet.pdf>
- [8] *THAT Corporation 1606/1646 Datasheet* [online]. THAT Corporation [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1606-1646_Datasheet.pdf>
- [9] *THAT Corporation 1280-Series Datasheet* [online]. THAT Corporation [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1280-Series_Datasheet.pdf>
- [10] *TL431, TL432 Precision Programmable Reference* [online]. Texas Instruments [cit. 2022-11-16]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf>>
- [11] *LT1054 Switched-Capacitor Voltage Converters With Regulators* [online]. Texas Instruments [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lt1054.pdf>>

- [12] MOSTELLER, Thomas a Christopher JARBOE. *Ultralow Noise, 48 V, Phantom Microphone Power Supply Using a Tiny DC-to-DC Boost Converter* [online]. Analog Devices, 2020 [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <<https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/raqs/raq-issue-176.pdf>>
- [13] HAUKE, Brigitte. *Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage* (Application Note No. SLVA372D) [online]. Texas Instruments, 2009 [cit. 2022-11-16]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/an/slva372d/slva372d.pdf>>
- [14] *AN-1956 LM5001 Boost Evaluation Board* [online]. Texas Instruments [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ug/snva393b/snva393b.pdf>>
- [15] *POWERSTAGE-DESIGNER Design tool*. Texas Instruments [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/tool/POWERSTAGE-DESIGNER>>
- [16] *LTpowerCAD*. Analog Devices [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <<https://www.analog.com/en/design-center/ltpowercad.html>>
- [17] *LM5001x High-Voltage Switch-Mode Regulator* [online]. Texas Instruments [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5001.pdf>>
- [18] *LT8362* [online]. Analog Devices [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt8362.pdf>>
- [19] *Simple Voltage Regulators Part 1: Noise*. TNT-Audio [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.tnt-audio.com/clinica/regulators_noise3_e.html>
- [20] *1455T2201 Drawing* [online]. Hammond Manufacturing [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <<https://www.hammg.com/files/parts/pdf/1455T2201.pdf>>
- [21] *Product Specification* [online]. Molex [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <<https://www.molex.com/content/dam/molex/molex-dot-com/products/automated/en-us/productspecificationpdf/990/99020/PS-99020-0088-001.pdf>>

Seznam symbolů a zkratek

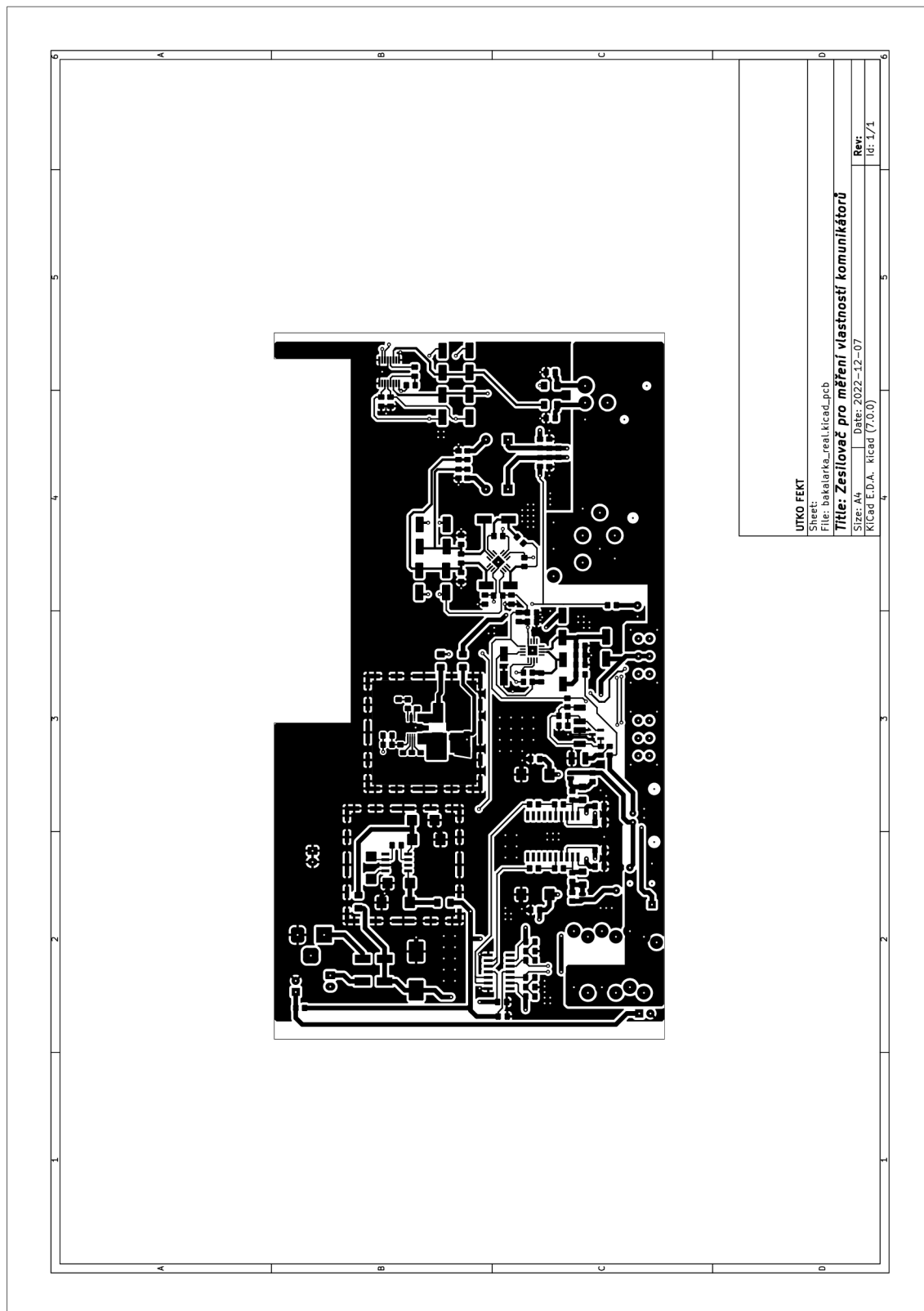
DPS	deska plošných spojů
ITU	Mezinárodní telekomunikační unie – International Telecommunication Union
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise – International Electrotechnical Commission
THD+N	celkové harmonické zkreslení + šum – Total Harmonic Distortion + Noise
EIN	ekvivalentní vstupní šum – Equivalent Input Noise
THT	vývodová montáž – Through-hole technology
SMT	povrchová montáž – Surface-mount technology
LED	svítivá dioda – Light-emitting Diode
RMS	efektivní hodnota – Root Mean Square value
SNR (S/N)	odstup signál-šum – Signal to Noise Ratio
CMRR	činitel potlačení souhlasného rušení – Common-Mode Rejection Ratio

Seznam příloh

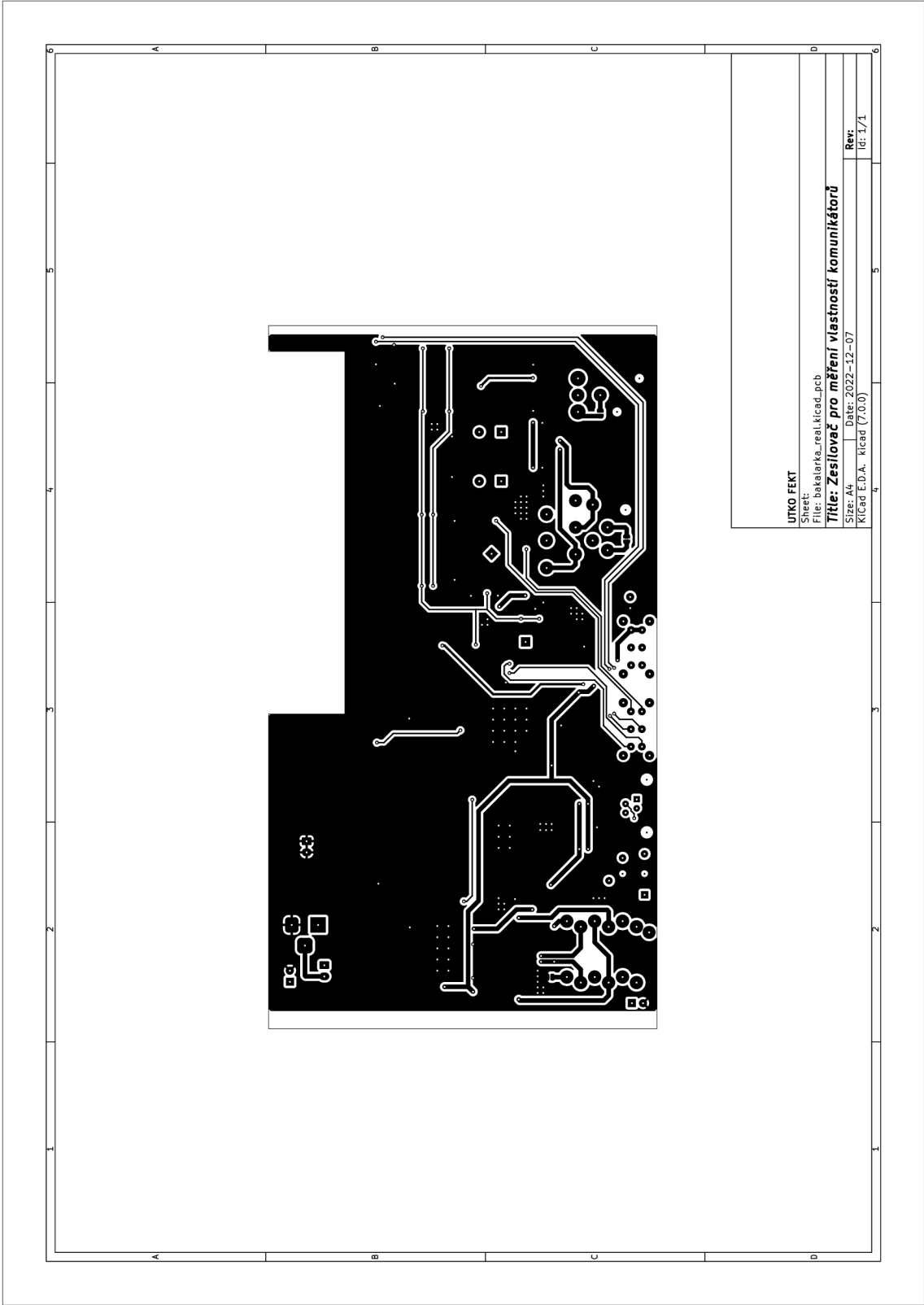
A Dokumentace DPS	57
A.1 DPS – spoje TOP	57
A.2 DPS – spoje BOTTOM	58
A.3 DPS – osazení TOP	59
A.4 DPS – osazení BOTTOM	60
B Schémata	61
B.1 Schéma – sluchátkový zesilovač	61
B.2 Schéma – předzesilovač elektretového mikrofону	62
B.3 Schéma – předzesilovač XLR mikrofону	63
B.4 Schéma – linkový budič	64
B.5 Schéma – napájecí zdroje	65
C Obsah elektronické přílohy (výběr)	67

A Dokumentace DPS

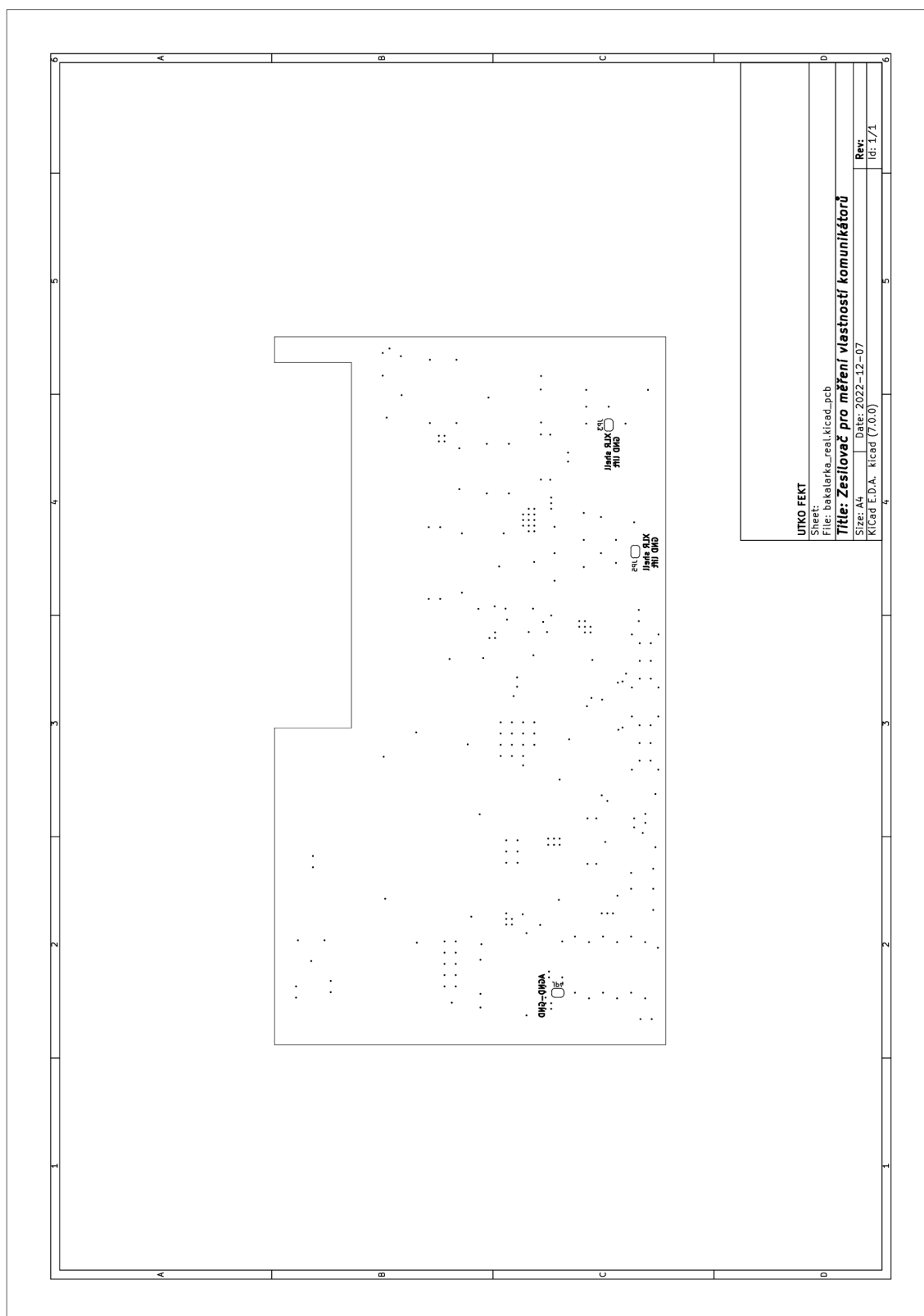
A.1 DPS – spoje TOP



A.2 DPS – spoje BOTTOM

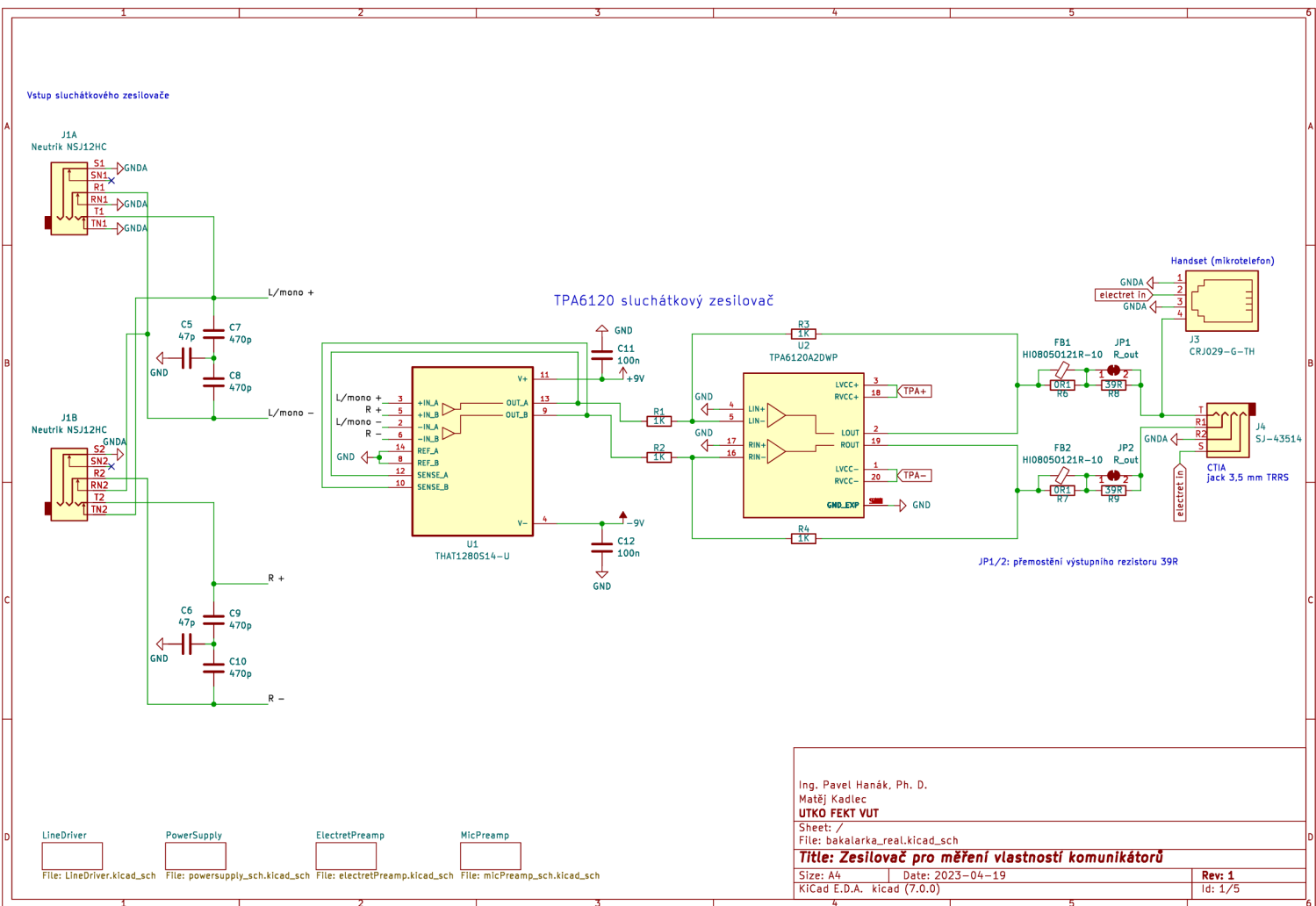


A.4 DPS – osazení BOTTOM

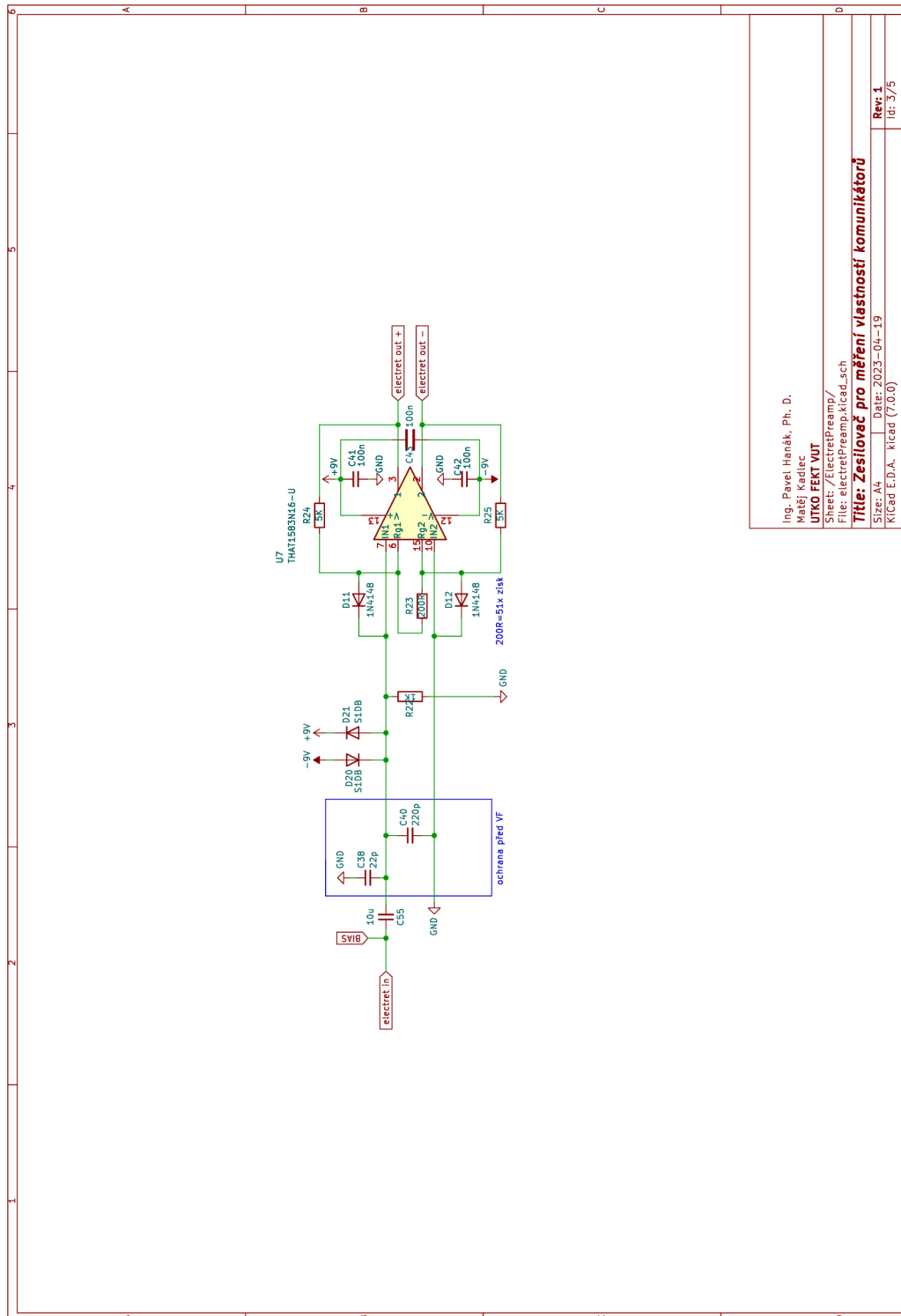


B Schémata

B.1 Schéma – sluchátkový zesilovač



B.2 Schéma – předzesilovač elektretového mikrofonu



Ing. Pavel Hanák, Ph. D.

Matěj Kadelec

UTKO FERT VUT

Sheet: /ElectretPreamp/

File: electretPreamp.kicad_sch

Title: Zesilovač pro měření vlastností komunikátorů

Size: A4

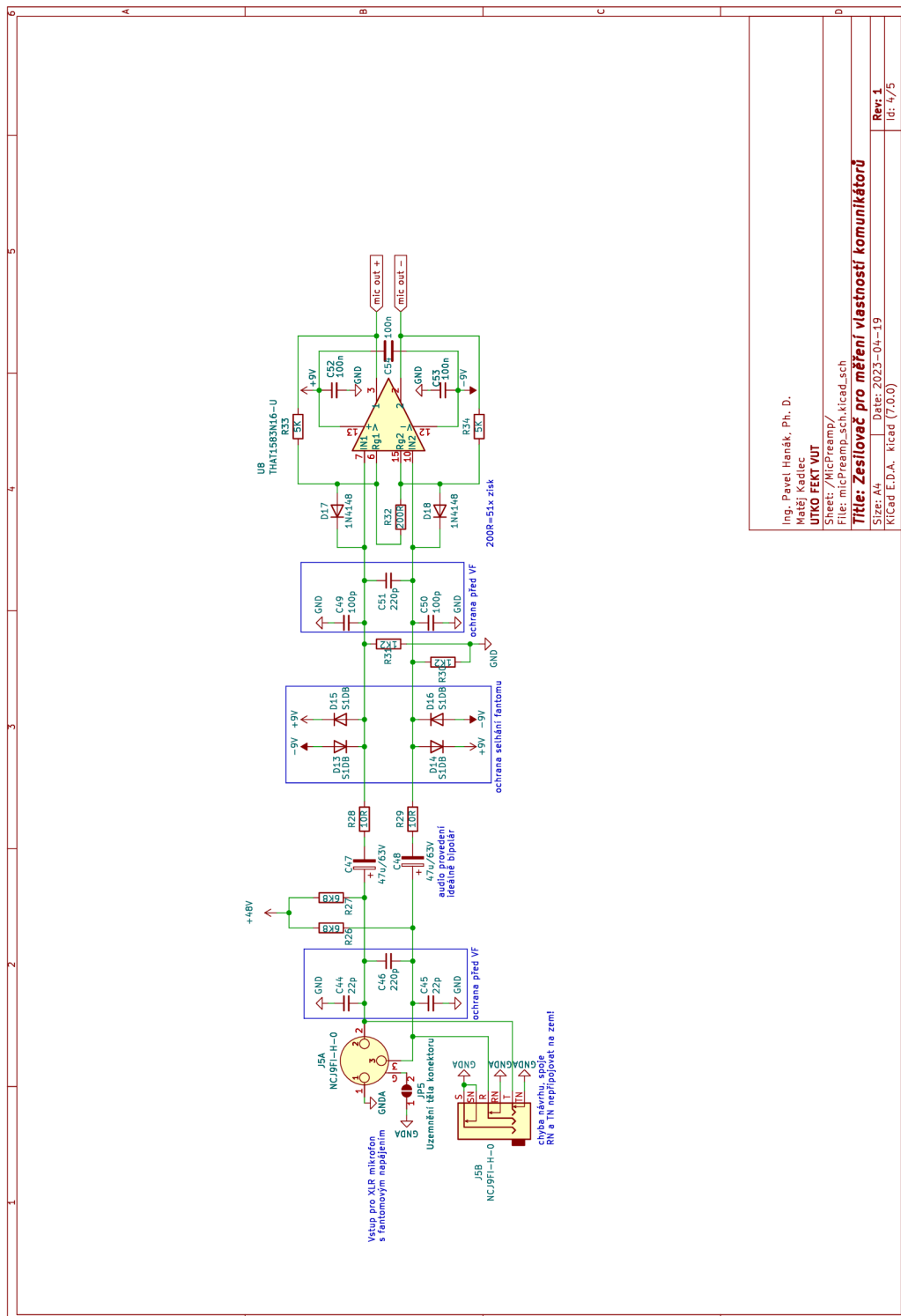
Date: 2023-04-19

Kicad E.D.A. kicad (7,0,0)

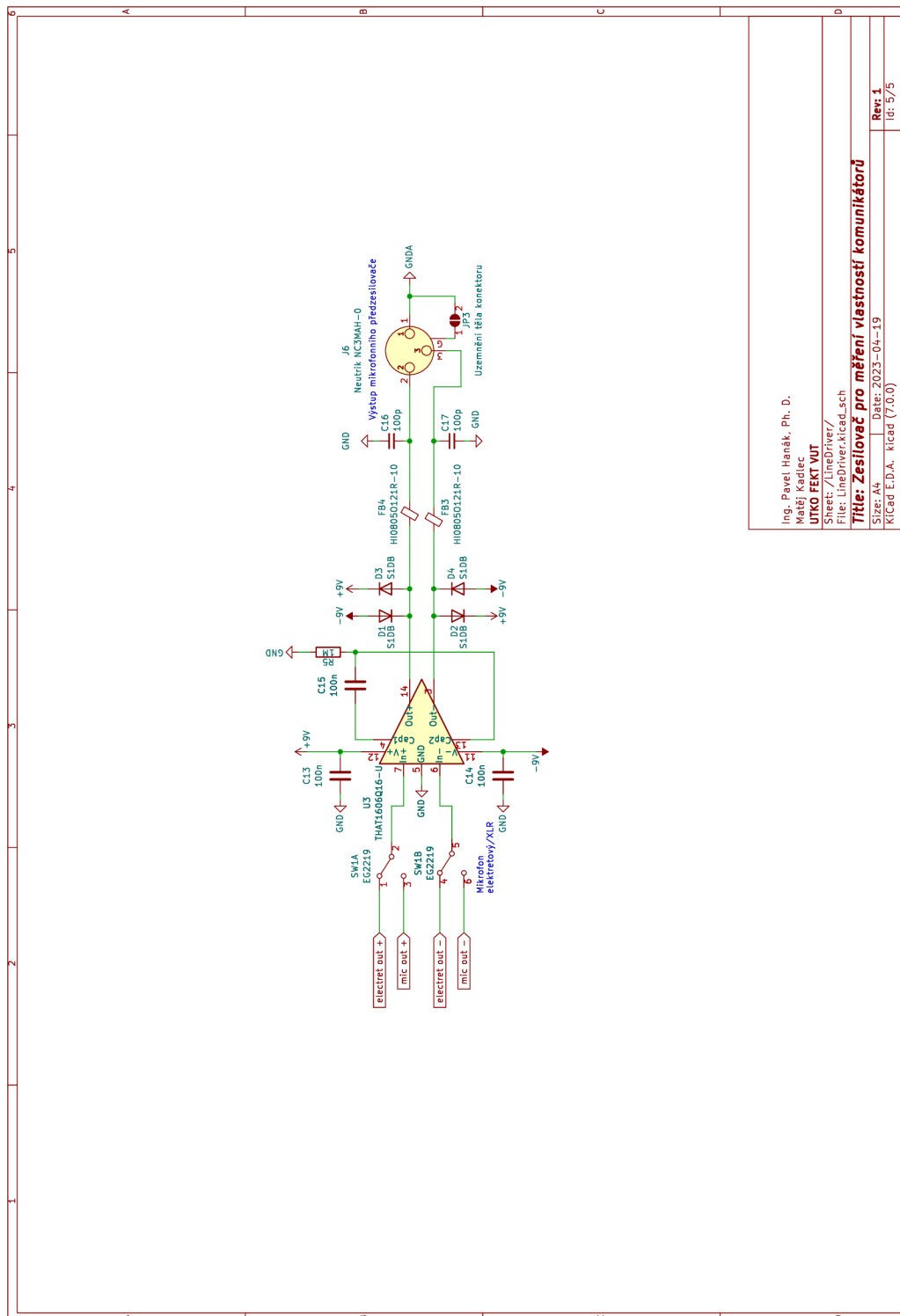
Rev: 1

Id: 3/5

B.3 Schéma – předzesilovač XLR mikrofonu



B.4 Schéma – linkový budič



Ing. Pavel Hanák, Ph. D.

Metěj Kadelec

UTKO FEKT VUT

Sheet: /LineDriver/

File: LineDriver.kicad_sch

Title: Zesilovač pro měření vlastností komunikátorů

Size: A4

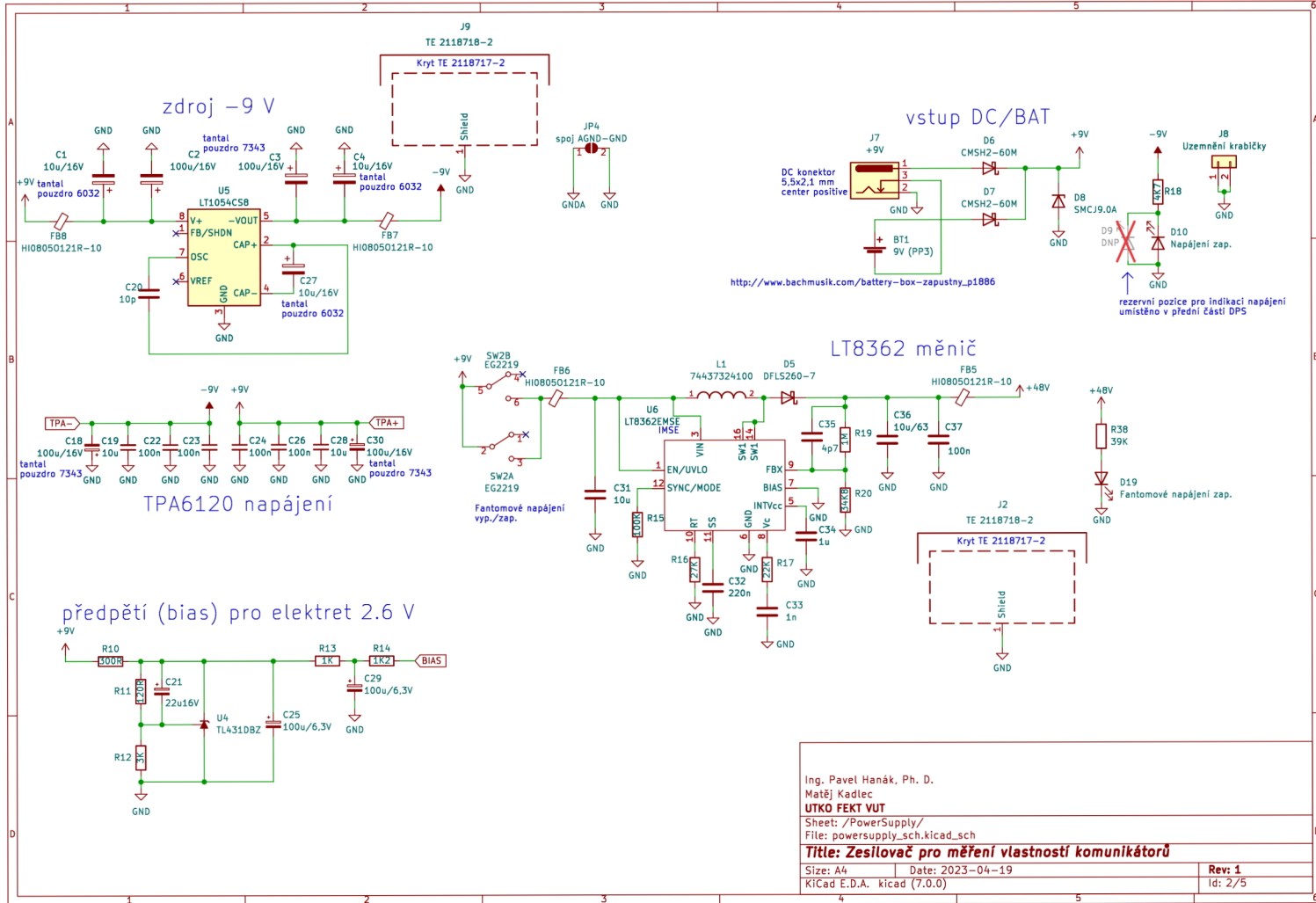
Date: 2023-04-19

Kicad E.D.A. kicad (7.0.0)

Rev: 1

Id: 5/5

B.5 Schéma – napájecí zdroje



65

C Obsah elektronické přílohy (výběr)

PRÍLOHY

APx mereni.....	Soubory z měření analyzátozem APx525
HeadAmp.....	Měření sluchátkového zesilovače
...	
RJmicPre.....	Měření nesymetrického mikrofonního předzesilovače
...	
TRSmicPre.....	Měření symetrického mikrofonního předzesilovače
...	
XLRmicPre.....	Měření symetrického mikrofonního předzesilovače
...	
KiCAD.....	Složka s projektem programu KiCAD
Bakalarka_kicad2.net	
electretPreamp.kicad_sch	
fp-info-cache	
LineDriver.kicad_sch	
micPreamp_sch.kicad_sch	
PhantomConverters.kicad_sch	
powersupply_sch.kicad_sch	
Zesilovac_komunikatory.kicad_pcb.....	DPS
Zesilovac_komunikatory.kicad_prl	
Zesilovac_komunikatory.kicad_pro.....	Projekt KiCAD 7
Zesilovac_komunikatory.kicad_sch.....	Schéma
Zesilovac_komunikatory.wrl	
bom.....	Interaktivní osazovací plán
...	
BPlibrary.....	Knihovna součástek
...	
DPS_PDF.....	Dokumentace DPS ve formátu PDF
...	
GERBER.....	Soubory Gerber pro výrobu DPS
...	
Schema_PDF.....	Schémata ve formátu PDF
...	
TeX.....	Zdrojové soubory L ^A T _E X
...	
Panely CAD návrh.....	Soubory pro panely krabičky
DXF pro výrobu.....	Výkresy DXF pro obrábění
PanelPredni_600dpi.png.....	Popisy předního panelu, 600 dpi
PanelZadni_600dpi.png.....	Popisy zadního panelu, 600 dpi
...	