



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**INTEGROVANÝ VÍCEKANÁLOVÝ AUDIO
ZESILOVAČ PRO DOMÁCÍ KINO**

INTEGRATED MULTICHANNEL AUDIO AMPLIFIER FOR HOME CINEMA

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Fišer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Ondřej Fišer

ID: 164265

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Integrovaný vícekanálový audio zesilovač pro domácí kino

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete blokovou a obvodovou strukturu integrovaného vícekanálového zesilovače ve třídě D, který by integroval vstupní analogové i digitální obvody, analogové korekční obvody, koncový stupeň ve třídě D (výkon cca 6 x 100 W / 4 nebo 8 ohmů), frekvenční dělení signálu a napájecí zdroj. Předpokládejte mikroprocesorové řízení celého zesilovače, s indikací pomocí připojeného displeje. Při návrhu zohledněte nejmodernější součástkovou základnu.

V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, atd.). Navržený audio zesilovač realizujte formou funkčního prototypu a experimentálním měřením v laboratoři nízkofrekvenční elektroniky ověřte jeho činnost. Výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN - technická literatura, 2003.
- [2] ŠTÁL, P. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D. BEN - technická literatura, Praha, 2008.
- [3] METZLER, B. Audio Measurement Handbook. Beaverton, Audio Precision, Inc., 1993.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá kompletním návrhem zesilovače pro domácí kino. Popisovaný zesilovač má dva digitální vstupy, tj. TOSLINK a S/PDIF a jeden analogový vstup. Pomocí těchto vstupů je možné připojit k zesilovači zdroj prostorového signálu 5+1. Práce se dále zabývá návrhem korekčních obvodů, obvodů předzesilovače, koncového stupně a zdroje. Celý výrobek je řízen pomocí 8-mi bitového mikrokontroléru a jeho grafický výstup je zobrazován na LCD. Cílem práce je návrh a realizace zesilovače špičkové kvality.

KLÍČOVÁ SLOVA

Domácí kino, DSP, AES3, prostorový zvuk, ATmega

ABSTRACT

This paper describes complete design of amplifier for home cinema system. Described amplifier has 2 digital inputs (TOSLINK and S/PDIF) and single analog input. With this inputs it is possible to connect amplifier to a source of surround audio 5+1 signal. Paper further discuss design of correction circuits, preamplifier, power amplifier and power source. The whole is controlled by 8-bit microprocessor and has a graphics output implemented through LCD display. The goal of this paper is to design and build high quality amplifier.

KEYWORDS

Home theatre, DSP, AES3, Surround sound, ATmega

Fišer, O. Integrovaný vícekanálový audio zesilovač pro domácí kino. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2016. 43 s., 38 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Integrovaný vícekanálový audio zesilovač pro domácí kino jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem 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 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.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

.....
(PODPIS AUTORA)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 ZESILOVAČ PRO DOMACÍ KINO	2
1.1 Obvodové řešení D/A převodníku	2
1.1.1 Digitální vstupy zesilovače	3
1.1.2 Prostorový zvuk Dolby Digital a Digital Theatre System	4
1.1.3 Optický přijímač	5
1.1.4 Přepínač vstupů	6
1.1.5 Digitální audio procesor STA310	6
1.1.6 D/A převodník	8
1.2 Přepínač vstupů	11
1.3 Korekční předzesilovač	12
1.3.1 Mapa úrovní přenášených signálů v zesilovači	12
1.3.2 Šestikanálový předzesilovač s OPA4134	13
1.3.3 Pětí pásmový korekční zesilovač a korekční zes. pro LFE kanál	15
1.3.4 Dolní propust pro LFE kanál	17
1.3.5 Řízení komunikace	18
1.4 Výkonový zesilovač	19
1.4.1 Diferenční zesilovač	20
1.4.2 Koncový stupeň	21
1.4.3 Řízení komunikace	23
1.5 Řízení	24
1.6 Napájecí zdroj	27
1.6.1 Vstup zdroje a usměrňovač	27
1.6.2 Pomocný zdroj	27
1.6.3 Řídicí obvod	27
1.6.4 Budič výkonového stupně	28
1.6.5 Výkonová spínací část zdroje	28
2 ŘÍDÍCÍ PROGRAM	30
2.1 Vývojový diagram	30

2.2	Čtení stavu koncového stupně	31
2.3	Komunikace po SPI a obsluha chip select	32
3	KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ	33
3.1	Konstrukce koncového stupně	33
3.2	Konstrukce korekční části.....	35
3.3	Konstrukce výkonového napájecího zdroje	36
3.4	Konstrukce pomocného napájecího zdroje	37
3.5	Konstrukční řešení procesorové desky	38
3.6	Konstrukční řešení úložného boxu	38
4	ZÁVĚR	39
	Literatura	40
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	41
	Seznam příloh	42
	Obsah přiloženého cd	82

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Blokové schéma zapojení zesilovače.	2
Obr. 1.2: Blokové schéma D/A převodníku.	2
Obr. 1.3: TOSLINK a TOSLINK Mini.	4
Obr. 1.4: Schéma optického přijímače.....	6
Obr. 1.5: Schéma přepínače vstupů.	6
Obr. 1.6: Struktura integrovaného obvodu audio procesoru.....	7
Obr. 1.7: Blokové schéma.....	8
Obr. 1.8: Schéma zdroje hodinového signálu.	8
Obr. 1.9: Schéma D/A převodníku (bez výstupního filtru).	9
Obr. 1.10: Schéma Butterworthova filtru 2. řádu.	10
Obr. 1.11: Modulová a fázová frekvenční charakteristika filtru (výsledek simulace). ..	11
Obr. 1.12: Schéma zapojení přepínače vstupů zesilovače.	12
Obr. 1.13: Blokové schéma korekčních obvodů.	12
Obr. 1.14: Mapa přenášených úrovní signálu v zesilovači.	13
Obr. 1.15: Schéma zapojení předzesilovače pro jeden kanál.	14
Obr. 1.16: Záv. hodnoty digi. převodníku na skutečném zesílení předzesilovače.	14
Obr. 1.17: Různá zapojení Prescottova syntetického induktoru.	15
Obr. 1.18: Schéma zapojení ekvalizéru pro stření reproduktor.	16
Obr. 1.19: Char. ekv. bez ekvalizace s vyznačeným mezním kmitočtem 138kHz.....	17
Obr. 1.20: Charakteristika ekvalizéru pro střídavé nastavení potenciometrů 0 - 100%. ..	17
Obr. 1.21: Schéma dolní propusti 3. řádu pro LFE kanál.	17
Obr. 1.22: Modulová frekvenční charakteristika filtru pro LFE kanál.	18
Obr. 1.23: Schéma zapojení bloku řízení komunikace.	19
Obr. 1.24: Blokové schéma výkonového zesilovače.	19
Obr. 1.25: Schéma zapojení diferenčního zesilovače.	20
Obr. 1.26: Přenosová charakteristika diferenčního zesilovače.	20
Obr. 1.27: Vnitřní struktura obvodu TAS5630.....	22
Obr. 1.28: Schéma zapojení řízení komunikace.	24
Obr. 1.29: Blokové schéma řízení.	24
Obr. 1.30: Blokové schéma napájecího zdroje.	27
Obr. 1.31: Schéma řídicí části napájecího zdroje.	28

Obr. 1.32: Schéma budiče výkonového spínače zdroje.	28
Obr. 1.33: Schéma výkonového stupně zdroje.	29
Obr. 2.1: Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér.	30
Obr. 2.2: Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér (pokračování).	31
Obr. 3.1: Prototyp koncového stupně – během osazování bez chladiče.	34
Obr. 3.2: Prototyp koncového stupně – pohled ze předu.	34
Obr. 3.3: Prototyp koncového stupně – pohled zezadu.	35
Obr. 3.4: Prototyp korekční části - během osazování.	36
Obr. 3.5: Prototyp výkonového zdroje – pohled z boku.	36
Obr. 3.6: Prototyp výkonového zdroje – pohled ze shora.	36
Obr. 3.7: Prototyp pomocného napájecího zdroje.	37
Obr. C.1: Modulová frekvenční charakteristika koncového stupně.	70
Obr. C.2: Modulová závislost přeslechů mezi kanály na kmitočtu.	71
Obr. C.3: Schéma zapojení pro měření vstupní impedance zesilovače	72
Obr. C.4: Schéma zapojení pro měření výstupní impedance zesilovače.	72
Obr. C.5: Závislost účinnosti na výstupním výkonu.	73
Obr. C.6: Výstupní spektrum koncového stupně.	74
Obr. C.7: Výstupní spektrum koncového stupně - vstup nakrátko.	74
Obr. D.1: Modulová frekvenční charakteristika LFE kanálu.	75
Obr. D.2: Modulová frekvenční charakteristika ekvalizéru.	76
Obr. E.1: Závislost účinnosti na výstupním výkonu výkonového zdroje.	78
Obr. E.2: Zatěžovací charakteristika výkonového zdroje.	78
Obr. E.3: Průběh napětí na výkonovém transformátoru.	79
Obr. E.4: Průběh napětí na výkonovém transformátoru – naprázdno.	79
Obr. E.5: Zvlnění výstupního napětí - $P_{\text{výstupní}} = 112 \text{ W}$, $U_{\text{napájecí}} = 51 \text{ V}$	80
Obr. E.6: Zvlnění výstupního napětí – naprázdno.	80
Obr. E.7: Zatěžovací charakteristika pomocného zdroje.	81

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Tabulka vlastností standardu AES3.....	3
Tab. 1.2: Základní vlastnosti A/D převodníku PCM1680.....	9
Tab. 1.3: Tabulka vlastností korekčních obvodů pro jednotlivá pásma.	16
Tab. 1.4: Popis připojených obvodů k demultiplexoru 4051.....	19
Tab. 1.5: Stavby zesilovače.	21
Tab. 1.6: Tabulka multiplexování stavových signálů.	23
Tab. 1.7: Mapa řídicích pinů a propojek v zesilovači.....	25
Tab. 1.8: Mapa řídicích pinů a propojek v zesilovači (pokračování).	26
Tab. 2.1: Výchozí konfigurace zesilovače.....	33
Tab. C.1: Tabulka hodnot modulové frekvenční charakteristiky	70
Tab. C.2: Tabulka měření odstupu signálu od šumu	71
Tab. C.3: Tabulka hodnot měření přeslechů mezi kanály	71
Tab. C.4: Tabulka hodnot měření vstupní impedance zesilovače	72
Tab. C.5: Tabulka hodnot měření výstupní impedance zesilovače	72
Tab. C.6: Tabulka hodnot měření účinnosti koncového stupně	73
Tab. D.1: Tabulka hodnot měření modulové frekvenční charakteristiky LFE kanálu ..	75
Tab. D.2: Tabulka hodnot měření frekvenční charakteristiky ekvalizéru	76
Tab. E.1: Tabulka hodnot měření zatěžovací charakteristiky výkonového zdroje.....	77
Tab. E.2: Tabulka měření zatěžovací charakteristiky pomocného zdroje	81

ÚVOD

Pojem domácí kino označuje komplexní systém k reprodukci videa a zvuku ve filmové či koncertní kvalitě v domácích podmínkách. Je kladen velký důraz na to, aby divák zažil stejný nebo minimálně srovnatelný zážitek jako v kině. Systém je tvořen zpravidla kvalitním LCD televizorem s velkou uhlopříčkou nebo projektořem a velmi kvalitním zesilovačem se soustavou reproduktorů zapojených prostorově rozložením např. Dolby Digital.

V dnešní době je na trhu nepřeberné množství „zesilovačů pro domácí kina“ v různých cenových i kvalitativních kategoriích. Mnohdy bohužel cena neznamená kvalitu. Tento zesilovač je navržen s důrazem na co nejvěrnější reprodukci.

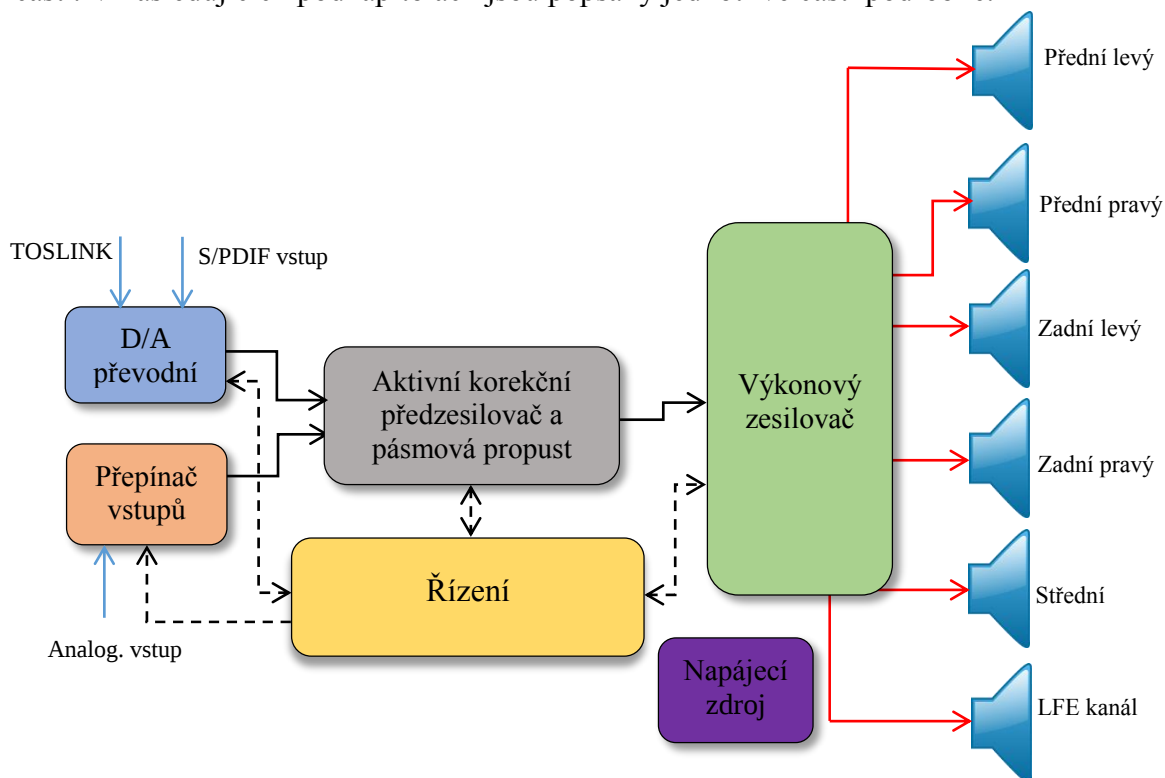
V první části se práce zabývá návrhem a realizací digitálních obvodů pro zpracování prostorového šestikanálového digitálního zvuku a převod na analogový signál následnou ekvalizací a koncovým stupněm. Srdce digitálních obvodů tvoří spolu s moderním digitálním audio procesorem STA310 šestikanálový D/A převodník PCM1680. Mezi hlavní vlastnosti DSP patří rozlišení 24-bitů a vzorkovací frekvence 44,1 kHz (což je minimální vzorkovací kmitočet pro zpracování audio signálu, aby byl dodržen Shannonův teorém) až 192 kHz, hardwarový dekodér MPEG-2 a Dolby Pro Logic, který umí vytvořit složitými algoritmy prostorový zvuk i z obyčejného stereofonního signálu. Dále následuje precizní předzesilovač a následně korekční obvody, ve kterých jsou použity syntetické induktory a digitální potenciometry. Speciální část korekčních obvodů tvoří výhybka pro subwoofer pro kmitočty do 150Hz. Koncový stupeň je tvořen trojicí výkonových zesilovačů ve třídě D TAS5630. Maximální výkon každého kanálu je cca 300 W při zátěži 4 Ω . Napájení celého zesilovače je zajištěno spínaným zdroje s topologií jednočinného polopropustného zdroje s polořízeným můstkem. Veškeré řízení všech obvodů zesilovače je zajištěno pomocí vestavěných sběrnic TWI a SPI.

V druhé části se práce věnuje ovládání celého zesilovače pomocí 8-bitového mikrokontroléru a návrhem softwaru. Návrh programu pro mikrokontrolér je prováděn v „Atmel Studio“ od firmy Atmel. Program zahrnuje funkce, jako jsou např. nastavení ekvalizéru, DSP, D/A převodníků, přepínání vstupů atd. Ovládání přístroje je řešeno pomocí grafického displeje a kodéru, kde je vytvořeno uživatelsky příjemné ovládací menu.

V poslední části práce je stručně shrnuto jakých výsledků bylo v této práci dosaženo.

1 ZESILOVAČ PRO DOMÁCÍ KINO

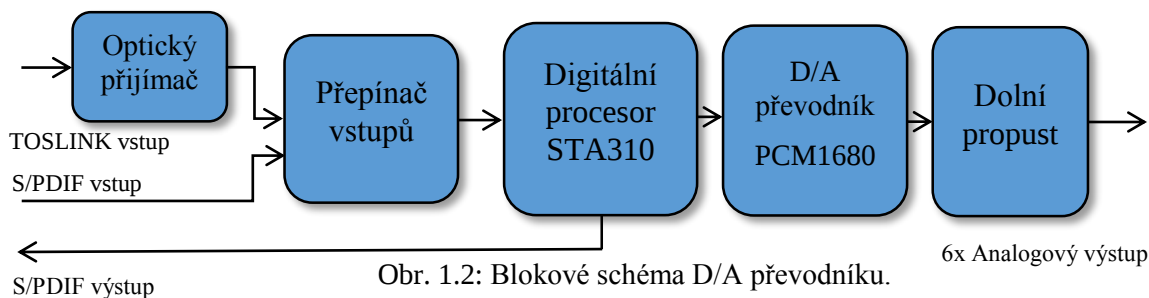
Na základě zadání a obecně známých informací o koncepci zesilovače bylo vytvořeno následující na obr. 1.1 blokové schéma, které obsahuje všechny hlavní funkční části. V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé části podrobně.



Obr. 1.1: Blokové schéma zapojení zesilovače.

1.1 Obvodové řešení D/A převodníku

Obvodové řešení D/A převodníku je rozděleno do pěti hlavních částí (viz. obr. 1.2), je to optický přijímač, přepínač vstupů, digitální procesor, D/A převodník a skupina filtrů pro odstranění kvantizačního šumu. Toto domácí kino obsahuje dva digitální vstupy pro audio signál, jedná se o optický vstup TOSLINK a elektrický vstup S/PDIF. Oba vstupy splňují standart IEC-61937, to znamená, že je k nim možné připojit až 6-ti kanálová audio data se ztrátovou kompresí ve formátech DTS a Dolby Digital.



Obr. 1.2: Blokové schéma D/A převodníku.

1.1.1 Digitální vstupy zesilovače

Pro co největší kompatibilitu zesilovače se všemi možnými zdroji signálu je zesilovač vybaven kromě klasického linkového vstupu dvojicí digitálních vstupů, TOSLINK a S/PDIF. Nespornou výhodou je i možnost trvalého připojení dvou zařízení do digitálních vstupů a pohodlné přepínání pomocí ovládacích prvků zesilovače.

S/PDIF je zkratka pro Sony/Philips Digital InterFace. Jedná se o kolekci nízkoúrovňových a hardwarových protokolů pro přenos digitálně kódovaného zvukového signálu mezi různými audio komponentami na krátkou vzdálenost. Jedná se o přenos dvoukanalového nekompresního PCM audia a přenos kompresního 5.1/7.1 prostorového zvuku. S/PDIF je spotřebitelskou verzí standardu AES3 (známého také jako AES/EBU), který je určený pro profesionální použití. AES3 se prakticky liší pouze úrovní signálu (viz. tab. 1.1) a jiným formátem dat s informacemi o stavu kanálu. Technicky je tedy možno přijímat signál AES3 běžnými S/PDIF přijímači. Ačkoliv použitý digitální procesor v tomto zesilovači (viz. kapitola 1.1.5) pro dekódování digitálního signálu podporuje všechny tři standardy (AES3, AES3 symetrický a S/PDIF), je možné použít pouze AES3 nesymetrický a S/PDIF. Data se přenáší po koaxiálním kabelu s impedancí 75 Ω zakončeného RCA konektorem.

	AES3 symetrický	AES3 nesymetrický	S/PDIF
Typ připojení	110 Ω STP	75 Ω koaxiální	75 Ω koaxiální/optické
Konektor	3-pin XLR	BNC	RCA/TOSLINK
Výstupní úroveň	2–7 V _{ss}	1.0–1.2 V _{ss}	0.5–0.6 V _{ss}
Minimální vstupní úroveň	0.2 V	0.32 V	0.2 V
Použitelná vzdálenost	100 m	1 000 m	10 m
Typ modulace	Linkový kód (BMC)	Linkový kód (BMC)	Linkový kód (BMC)
Kódování stavu kanálu	ASCII id. text	ASCII id. text	SCMS (ochrana aut. práv)
Maximální rozlišení	24 bitů	24 bitů	20 bitů (24 bitů – rozšířená verze)

Tab. 1.1: Tabulka vlastností standardu AES3.

TOSLINK na obr. 1.3 je standardizovaný propojovací systém optických kabelů s oficiálním názvem „optický EIAJ“ vyvinutý společností Toshiba Corporation v 90. letech minulého století. Nejčastěji se používá pro propojování audio vybavení jak ve spotřební tak v profesionální elektronice, protože se u něj prakticky nevyskytuje žádné rušení. Audio signál se přenáší ve formě digitálního proudu dat nejčastěji po 1mm plastovém optickém kabelu, pro profesionální účely se může využít i skleněného vlákna (má lepší vlastnosti, menší útlum a větší šířku pásma). Zdrojem modulačního signálu bývá červená LED dioda s vlnovou délkou 650 nm. Celý systém je omezen délkou

optického kabel na cca 10 metrů z důvodu velkého útlumu vlákna. TOSLINK podporuje podobně jako S/PDIF (systémy jsou vzájemně kompatibilní) dva základní formáty přenosu. Jedná se o přenos dvoukanalového nekompresního PCM audia a přenos kompresního 5.1/7.1 prostorového zvuku. TOSLINK konektor se vyrábí ve dvou základních provedeních, v normální velikosti a velikosti mini – 3,5 mm.



Obr. 1.3: TOSLINK a TOSLINK Mini (převzato z [1]).

Bohužel ani jedním z těchto systémů kvůli nedostatečné šířce pásma nelze přenášet formáty posledních let, jako jsou např. Dolby TrueHD a DTS-HD Master Audio. Přenos těchto formátů nabízí např. HDMI nebo DisplayPort.

1.1.2 Prostorový zvuk Dolby Digital a Digital Theatre System

Dolby Digital je označení ztrátové komprese vyvinuté společností Dolby Laboratories ve 20. letech minulého století. Nejčastěji se vyskytuje konfiguraci 5.1 (pět plno rozsahových kanálů a jeden LFE kanál pro subwoofer). Původně se tato konfigurace hojně využívala v kinech (později byla nahrazena novějšími konfiguracemi), dnes tento formát můžeme najít v multimediálních souborech, jako jsou MKV nebo AVI.

Varianty:

- **Dolby Digital 1.0** – mono
- **Dolby Digital 2.0** – obsahuje 2 zvukové kanály a může být buď stereo, mono nebo dual
- **Dolby Digital 2.0 Surround** – obsahuje navíc informaci o tom, že se jedná o Dolby Surround
- **Dolby Digital 4.0** – obsahuje 4 samostatné kanály levý, střední, pravý a zadní
- **Dolby Digital 5.0** - nepříliš častá varianta obsahuje 5 samostatných kanálů (přední levý, střední, přední pravý, zadní levý a zadní pravý) bez basového LFE kanálu
- **Dolby Digital 5.1** – nejčastější varianta, obsahující 5 hlavních plnorozsahových kanálů (přední levý, střední, přední pravý, zadní levý a zadní pravý) a jeden LFE kanál
- **Dolby Digital 5.1 EX** - vedle klasických 5.1 kanálů obsahuje navíc ještě zadní střední kanál, který je maticově zakódovaný v zadním levém a v

zadním pravém kanálu

- **Dolby Digital Plus** - podporuje až 13.1 zvukových kanálů

Maximální datové toky:

- **AC-3:** 640 kbit/s (448 kbit/s u Dolby Digital 5.1)
- **Dolby Digital Plus:** 3 Mbit/s

Digital Theatre System je vícekanálový formát se ztrátovou kompresí používaný v dnešní době především v kinech. Vznikl ve stejné době jako Dolby Digital, nicméně jej v mnoha ohledech předčil. Systém využívá kodeky MPEG a MPEG 2.

Varianty:

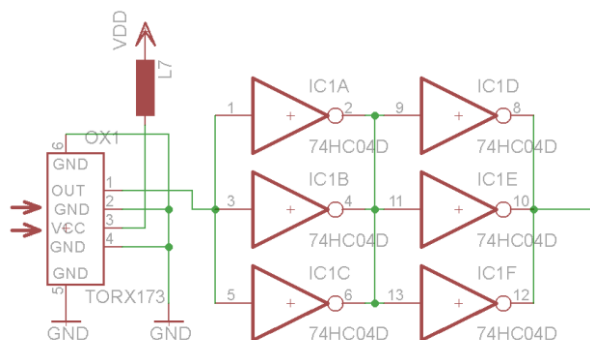
- **DTS 5.1** - nejčastější varianta, obsahující 5 hlavních plnorozsahových kanálů (přední levý, střední, přední pravý, zadní levý a zadní pravý) a jeden LFE kanál, je to obdoba jako u Dolby Digital
- **DTS-ES Matrix 6.1** - Varianta obsahující vedle klasických 5.1 kanálů navíc jeden zadní centrální kanál maticově zakódovaný v levém zadním a pravém zadním kanálu
- **DTS-ES Discrete 6.1** - liší se od předchozího tím, že zadní centrální kanál je zakódován samostatně, tudíž je zde 6.1 samostatně zakódovaných zvukových kanálů
- **DTS 96/24** - nabízí kvalitu zvuku jako originální 96kHz/24bit master nahrávka
- **DTS NEO:6** - funguje na podobném principu jako Dolby Pro Logic II, ze stereo nahrávky dokáže udělat 5.1 nebo 6.1 zvuk.

Maximální datové toky:

- **DTS:** 1536 kbit/s (u DTS 96/24 rozlišení 24 bitů a vzorkovací frekvenci 96 kHz)
- Kompresní poměr: 4:1 až 8:1

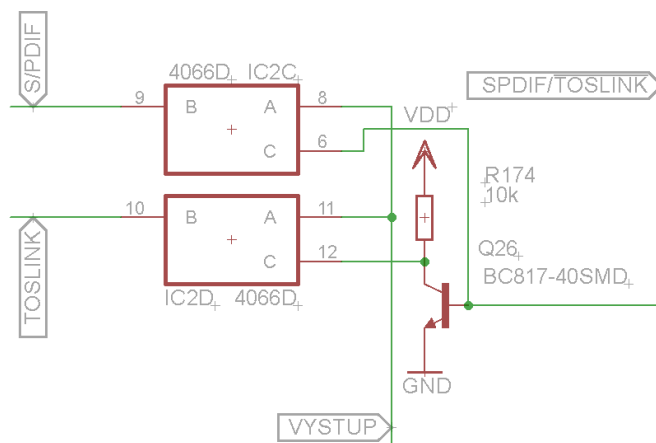
1.1.3 Optický přijímač

Na vstupu zesilovače je umístěn přijímač optického signálu pro TOSLINK vstup (viz. obr. 1.4). Je osazen přijímačem TORX173 od značky Toshiba, který svými vlastnostmi plně dostačuje našim požadavkům. Jeho maximální přenosová rychlost je 6 Mbit/s a napájecí napětí 7 V (použité napájecí napětí je 5 V). Za ním následuje šestice invertorů 74HC06, které mají funkci tvarovače signálu, tzn. odstranění případných zákrmitů.



1.1.4 Přepínač vstupů

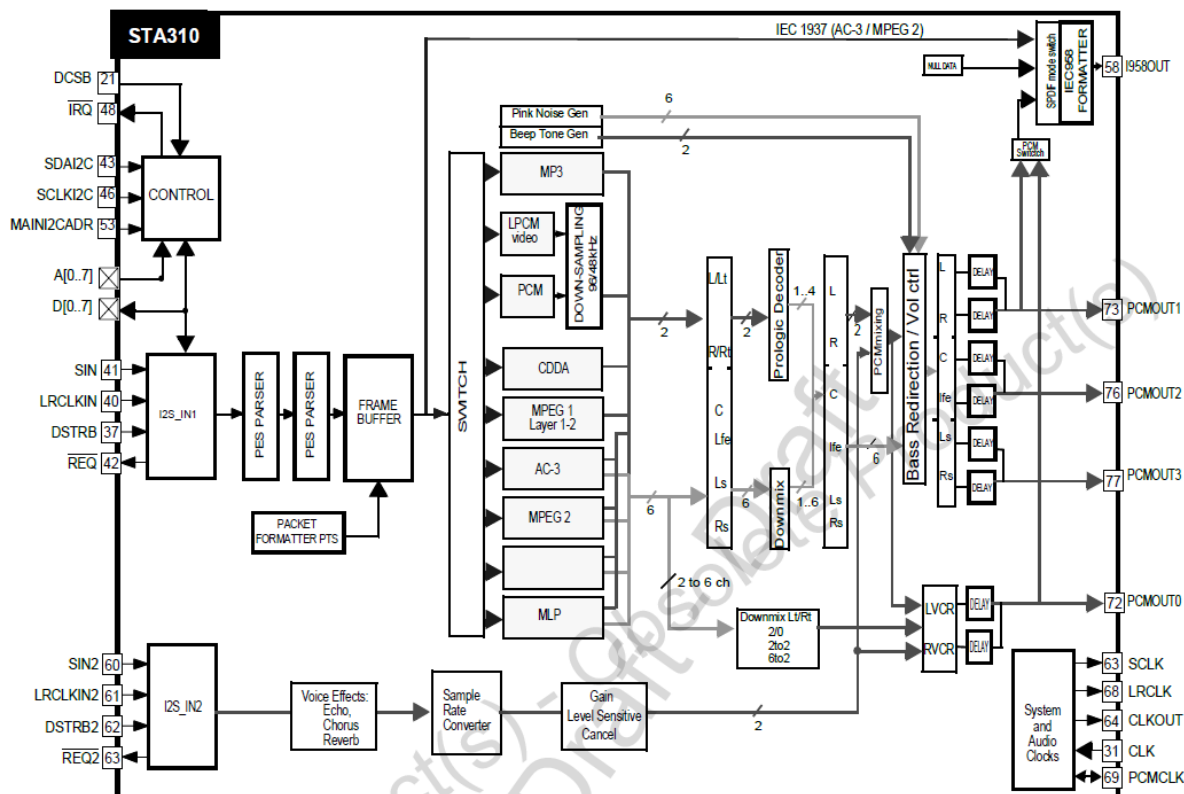
Dalším blokem za digitálními vstupy zesilovače je přepínač vstupů (viz. obr. 1.5). Tento blok je v zesilovači nutný, protože digitální procesor má pouze jeden digitální vstup a my požadujeme dva (elektrický S/PDIF a optický TOSLINK). Tranzistor Q26 zajišťuje invertovanou úroveň řídicího signálu pro přepínač IC2D. Vlastní přepínač je realizovaný dvojicí přepínačů, obvodem CD4066. Výběr vstupu je ovládán z řídicí desky pomocí jednoho vodiče, v logické jedničce je aktivní vstup S/PDIF, v logické nule je aktivní vstup TOSLINK. Tento blok je napájen napájecím napětím 5V.



1.1.5 Digitální audio procesor STA310

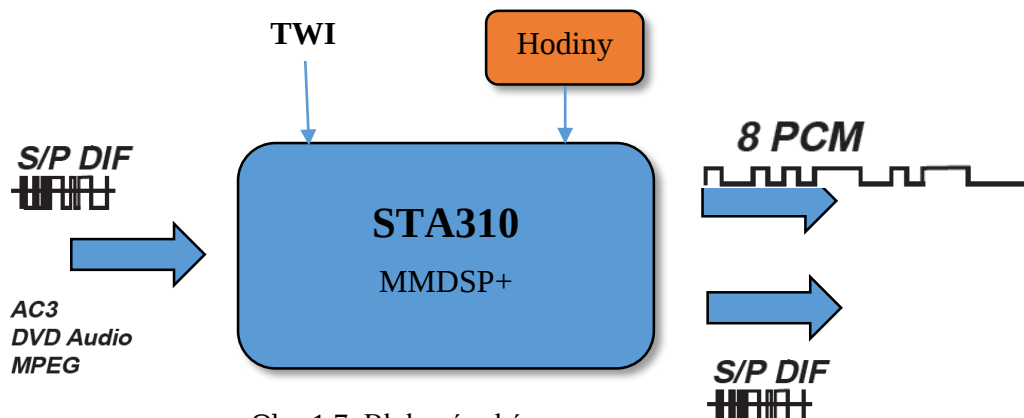
Srdce zpracování digitálního prostorového zvuku tvoří digitální audio procesor STA310. Výběr vhodného procesoru nebyla vůbec jednoduchá záležitost, protože požadavky byly velmi specifické. Prvním zásadním kritériem bylo, aby procesor uměl zpracovat minimálně 6-ti kanálový signál (mnoho procesorů podporuje třeba osm vstupů digitálních dat, ale pouze ve formátu PCM, nikoliv kompresních dat 5.1/7.1), dále pak aby byl dostupný (co se týče nákupu, tak i ceny), uměl pracovat s více formáty kromě AC-3, podporoval moderní rozlišení a vzorkovací kmitočty (např. formát DTS 96/24), nepotřeboval ke svému řízení žádné složité studio, dal se konfigurovat jednoduše přímo mikrokontrolérem, byl v pouzdru, které se dá bez problému zapájet a mnoho dalšího.

Na základě těchto požadavků byl vybrán MMDSP+ (multi-formátový digitální signální procesor) STA310 od světového výrobce STMicroelectronics. Procesor funguje jako dekodér DVD-Audio (6 kanálů MLP, 8 kanálů LPCM, vzorkovací rychlost 44,1kHz - 192kHz s rozlišením 24 bitů) a jako dekodér 5.1 Dolby Digital Surround umí zpracovat formáty, jako jsou: **MPEG 1** – layer I, II; **MPEG 2** – layer I, II; **MP3** (MPEG 2 - layer III) a obsahuje nadstandardní periférie, jako jsou karaoke systém a Dolby Pro Logic (procesor má integrovanou vyrovnávací paměť 35ms pro každý kanál) (viz. obr. 1.6).



Obr. 1.6: Struktura integrovaného obvodu audio procesoru (převzato z [2]).

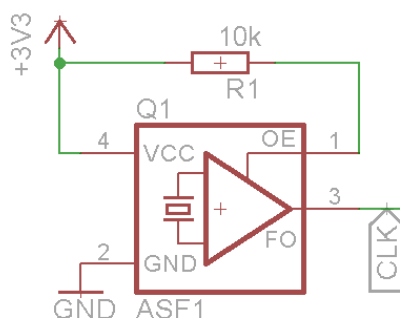
Nespornou výhodou tohoto procesoru je realizace „vše v jednom čipu“, tzn. k realizaci funkčního prototypu audio procesoru, stačí jen tento jeden integrovaný obvod, zdroj hodinového kmitočtu a externí filtr RC pro fázový závěs hodinového signálu (PLL syntézu). Procesor pracuje s dvojicí napájecích napětí: 2,5 V pro napájení jádra procesoru a 3,3 V pro napájení ostatních periférií. Ovládání je zajištěno pomocí sběrnice TWI. Adresa zařízení je manuálně nakonfigurována na pinech A0-A7 rezistory na adresu 0x28.



Obr. 1.7: Blokové schéma.

Audio procesor je vybaven dvojicí digitálních vstupů, I2S a S/PDIF. Nicméně v tomto zesilovači je využit pouze vstup S/PDIF (viz obr. 1.7), protože vstup I2S je určen spíše pro přenos audia mezi jednotlivými integrovanými obvody zesilovače a v našem případě nepředchází audio procesoru žádný integrovaný obvod, který by zpracovával audio signál. Výstup procesoru je připojen pomocí sběrnice I2S obsahující 8 kanálů PCM signálu k D/A převodníku (viz kapitola 1.1.6). Na zadní stranu šasi domácího kina je vyveden druhý S/PDIF, pro možnost připojení k dalšímu zařízení, např. k dalšímu zesilovači.

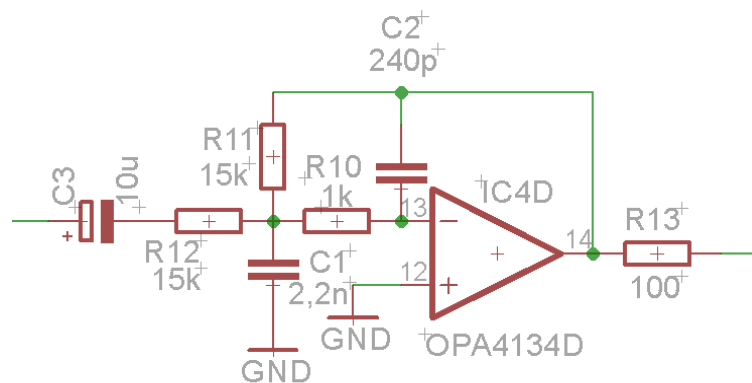
Jako zdroj hodinového signálu byl vybrán keramický SMD generátor o kmitočtu 27 MHz a napájením napětí 3,3 V. Tento generátor nepotřebuje ke své funkci žádné externí součástky, je opatřen pinem „enable“ (umožňuje vypnout generátor), který je připojen přes ochranný rezistor na napájecí napětí (viz. obr. 1.8).



Obr. 1.8: Schéma zdroje hodinového signálu.

1.1.6 D/A převodník

S ohledem na požadavek co nejvěrnější reprodukce byl vybrán D/A převodník PCM1680 (viz. obr. 1.9) od společnosti Texas Instruments, který má špičkové vlastnosti (viz tab. 1.2), obsahuje 8 D/A převodníků, takže nejsou třeba další obvody a pracuje s nesymetrickým napájením 5 V. Díky architektuře Delta-Sigma tento převodník dosahuje velmi vysoké linearity s rozlišením 24 bitů a pokrývá celé nízkofrekvenční pásmo. Nicméně použití této architektury přináší také nutnost použití výstupního filtru. Mimo již zmíněný formát I2S, převodník podporuje formáty Right-Justified a Left-Justified. Přepínání formátů a celkové řízení je zajištěno pomocí sběrnice SPI a TWI (v našem případě je využita sběrnice TWI, nastaveno pinem MSEL). Adresa zařízení je defaultně nastavená na 0x4C (nastaveno pinem MS/ADR).



Obr. 1.10: Schéma Butterworthova filtru 2. řádu.

Rovnice [1] až [4] popisují obecné vztahy pro přenos, zesílení a mezní kmitočet filtru.

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{(2\pi \cdot f_c)^2 \cdot A}{s^2 + \frac{1}{Q} \cdot (2\pi \cdot f_c) \cdot s + (2\pi \cdot f_c)^2} \quad (1.1)$$

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{-\frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}{s^2 + s \cdot \frac{1}{C_1} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) + \frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad (1.2)$$

$$A = -\frac{R_3}{R_1} \quad (1.3)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad (1.4)$$

Pro Butterworthův filtr 2. řádu platí, že jakost filtru je rovna převrácené hodnotě odmocniny ze dvou a kmitočet F_0 je roven jedné. Dále jsme si stanovili hodnoty kondenzátorů C_1 , C_2 a na základě požadovaného zesílení byl určen poměr rezistorů R_3 a R_1 , viz vztah [5]. Následně jsme ze vztahů [1] a [2] vyjádřili dvě rovnice [6] a [7] pro výpočet zbývajících součástí.

Shrnutí známých hodnot: $C_1 = 2,2 \text{ nF}$; $C_2 = 240 \text{ pF}$; $Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$; $f_c = 300 \text{ kHz}$; $A = -1$

$$A = -1 \rightarrow R_3 = R_1 \text{ (pro zjednodušení dále jako R)} \quad (1.5)$$

$$(2\pi \cdot f_c)^2 \cdot A = -\frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2} \quad (1.6)$$

$$\frac{2}{Q} \cdot (2\pi \cdot f_c) = \frac{1}{C_1} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) \quad (1.7)$$

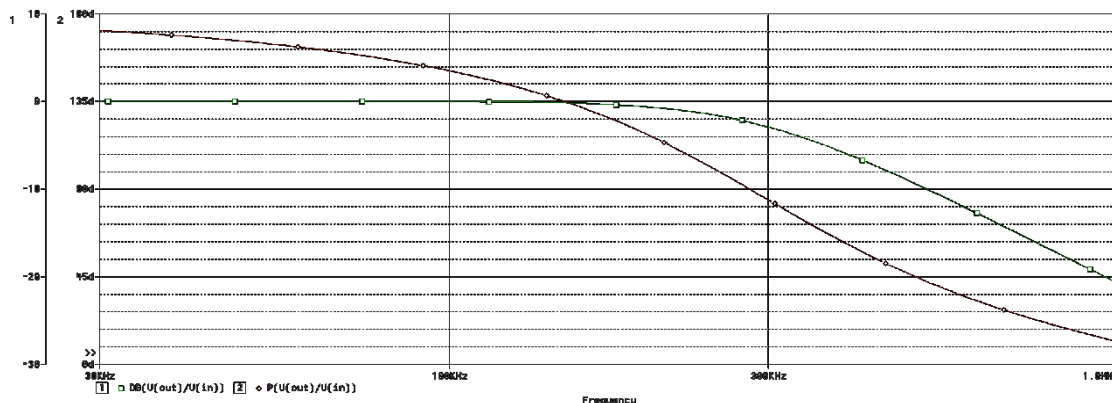
Po vyčíslení jsme získali rovnice [8] a [9], ze kterých jsme po vyjádření R_2 a R získali výslednou hodnotu rezistorů. V poslední kroku jsme dosadili do rovnice [4] pro výpočet mezní frekvence, abychom novou zjistili mezní frekvenci a odchylku od požadované mezní frekvence ($\Delta f_{\%} = 2,5\%$), která vznikla zaokrouhlením vypočítaných rezistorů do řady E12.

$$\frac{2}{\sqrt{2}} \cdot (2\pi \cdot 300 \cdot 10^3) = \frac{1}{2,2 \cdot 10^{-9}} \cdot \left(\frac{2}{\frac{1}{(2\pi \cdot 300 \cdot 10^3)^2 \cdot R_2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 240 \cdot 10^{-12}}} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.8)$$

$$\frac{2}{\sqrt{2}} \cdot (2\pi \cdot 300 \cdot 10^3) = \frac{1}{2,2 \cdot 10^{-9}} \cdot \left(\frac{2}{R} + \frac{1}{1300} \right) \quad (1.9)$$

$$R = 392.51 \, \Omega \doteq 390 \, \Omega ; R_2 = 1368.25 \, \Omega \doteq 1,3 \, k\Omega$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{390 \cdot 1300 \cdot 2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 240 \cdot 10^{-12}}} = 307,61 \, \text{kHz} \quad (1.10)$$

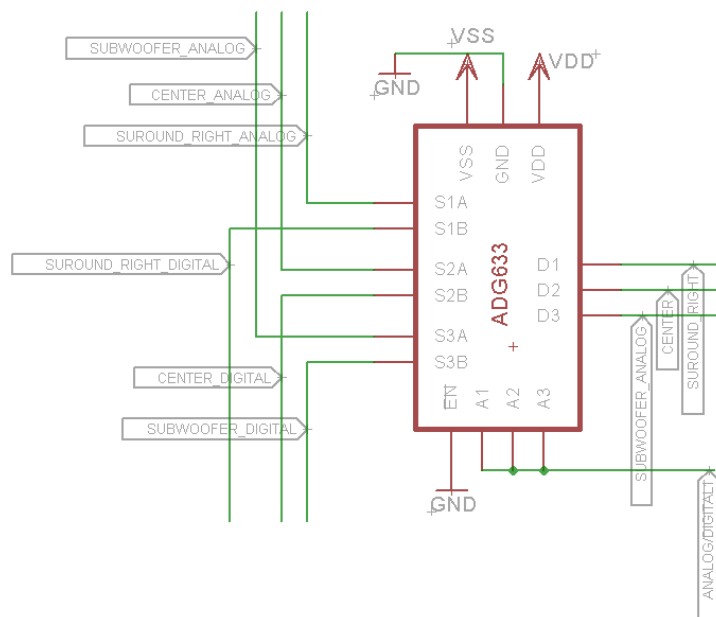


Obr. 1.11: Modulová a fázová frekvenční charakteristika filtru (výsledek simulace).

Ze simulace na obr. 1.11 je patrné že mezní kmitočet filtru je 303,6 kHz, strmost je 39,6 dB/dek, což plně vyhovuje našim požadavkům.

1.2 Přepínač vstupů

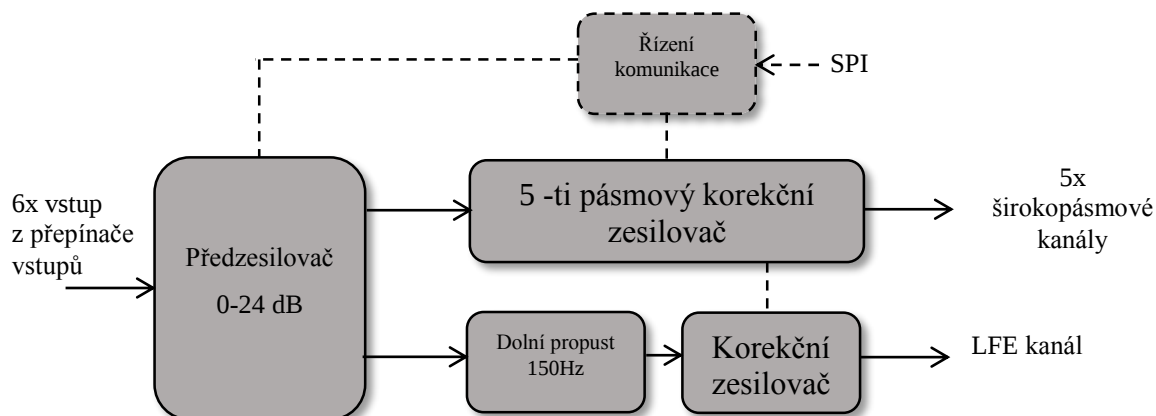
Obvodové řešení hlavního přepínače vstupů na rozdíl od předchozí kapitoly je tvořeno pouze jednou poměrně jednoduchou částí. Hlavní funkce přepínače je možnost výběru mezi některým z digitálních vstupů (převedených blokem D/A převodníkem na analogovou hodnotu) a analogovým prostorovým vstupem. Výstup jednotlivých přepínačů je zaveden na vstup části korekčního zesilovače viz. kapitola 1.3. Obvod je řešen podobně jako v kapitole 1.1.4 dvojicí obvodů ADG633 napájených symetrickým napájením $\pm 5 \, \text{V}$. Tyto obvody se vyznačují velmi malým zkreslením na rozdíl např. od obvodů CD4066, které mají zkreslení 0,5%. Na obr. 1.12 je schéma zapojení přepínače pro tři vstupy. Řízení je pro oba obvody realizováno pomocí jednoho vodiče.



Obr. 1.12: Schéma zapojení přepínače vstupů zesilovače.

1.3 Korekční předzesilovač

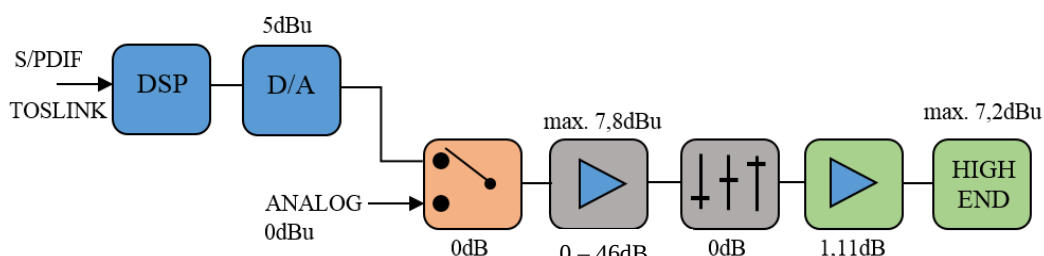
Obvody korekčního zesilovače jsou rozděleny do 4 hlavních bloků (viz. obr. 1.13), je to předzesilovač, 5 -ti pásmový ekvalizér a dolní propust s ekvalizérem pro LFE kanál.



Obr. 1.13: Blokové schéma korekčních obvodů.

1.3.1 Mapa úrovní přenášených signálů v zesilovači

Na základě potřeby dosažení plného vybuzení koncového stupně i z velmi slabých zdrojů signálu vznikla následující mapa úrovní (viz obr. 1.14). Mapa popisuje maximální výstupní úrovně a zesílení jednotlivých částí zesilovače a vstupní úrovně koncového stupně. Na základě této mapy vznikl předběžný odhad na softwarové nastavení předzesilovače a regulátorů hlasitosti v závislosti na výběru vstupu.

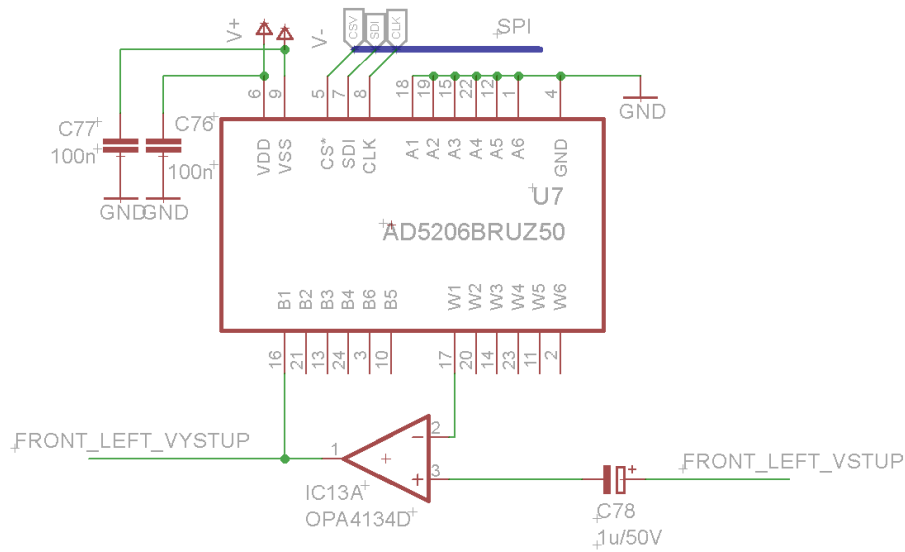


Obr. 1.14: Mapa přenášených úrovní signálu v zesilovači.

1.3.2 Šestikanálový předzesilovač s OPA4134

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3.1 tento zesilovač je koncipován tak, aby mohl, dosáhnou plného vybuzení i z těch nejslabších analogových zdrojů signálu. Proto obsahuje šestikanálový neinvertující předzesilovač, který má za úkol kompenzovat rozdíl úrovní vstupních signálů a požadovaných úrovní signálu. Při použití digitálních vstupů má předzesilovač nastavenou optimální hodnotu zesílení na cca 1,3 dB. Při použití analogových vstupů je předzesilovač nastaven na výchozí hodnotu cca 0 dB, nicméně ji lze manuálně měnit (viz kapitola 2.1). Předzesilovač má maximální zesílení 46 dB, nicméně maximální úroveň vstupního signálu je pouze 7,8 dBu (omezeno napájecím napětím). Toto číslo má hned několik opodstatnění, tím hlavním je ochrana koncového stupně před poškozením vstupu vysokým napětím. V konstrukci je opět využit již zmíněný precizní operační zesilovač OPA4134 (téměř všechny OZ v zesilovači jsou tohoto typ, díky jeho vynikajícím vlastnostem). Operační zesilovač je napájen symetrickým napájením $\pm 3,9$ V. Z mapy úrovní signálů na obr. 1.14 vyplývá, že pro výstupní úroveň 7,8 dBu by teoreticky stačilo napětí $\pm 2,5$ V, nicméně velkým a jediným neduhem tohoto obvodu je jeho nesouměrné maximální napětí v kladné a záporné větvi. Pro výstupní zátěž obvodu 10 k Ω je uváděna maximální hodnota výstupního signálu pro záporné napětí $U_{(-)napájecí} + 0,5$ V a pro kladné napětí $U_{(+)napájecí} - 1,2$ V. Vstupní impedance OZ je cca 100T Ω a je rovna vstupní impedanci analogového vstupu zesilovače.

Změnu zesílení je možné měnit pomocí šestikanálového digitálního potenciometru AD5206 od společnosti Analog Devices. Tento potenciometr má hodnotu 50 k Ω , 256 nastavitelných kroků a napájen je symetrickým napětím $\pm 2,5$ V (tím je také omezena velikost vstupního signálu na cca 7,8 dBu, nesmí být větší, než je napájecí napětí). Celkové harmonické zkreslení obvodu je v porovnání s operačním zesilovačem OPA4134 o dva řády horší i šum je vyšší (THD+N je 0,004%, šum je 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$), nicméně podobný obvod s výrazně lepšími parametry je problematické sehnat. Řízení obvodu je zajištěno pomocí sběrnice SPI, o obsluhu pinu CS (Chip select) se stará část řízení komunikace (viz. kapitola 1.3.6).

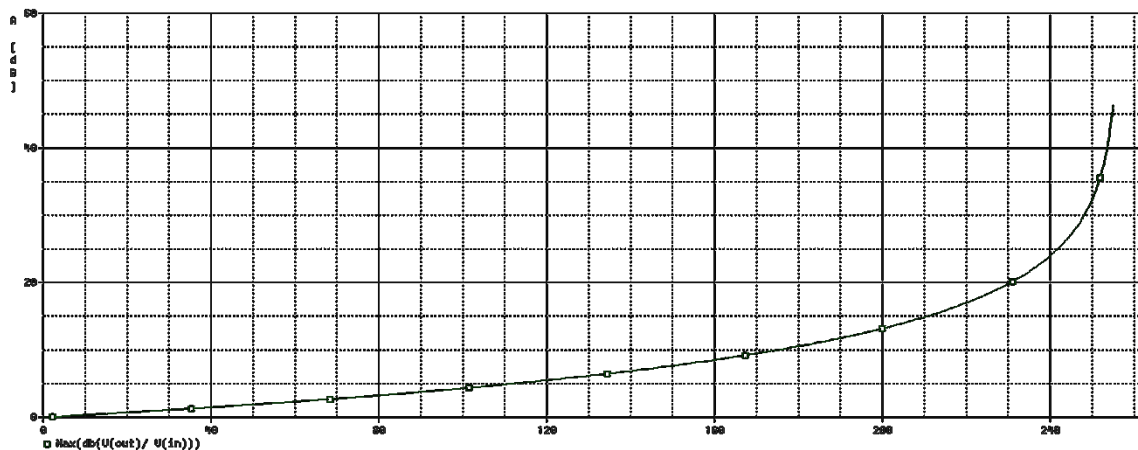


Obr. 1.15: Schéma zapojení předzesilovače pro jeden kanál.

Kondenzátor C78 na obr. 1.15 slouží jako stejnosměrné oddělení předzesilovače od přechodného stupně a zároveň tvoří spolu se vstupní impedancí OZ derivační článek. Rovnice [11] ověřuje, zda má mezní kmitočet nějaký vliv na šířku slyšitelného pásma předzesilovače. Rovnicí [12] je naznačeno jak počítat zesílení předzesilovače v závislosti na nastavení digitálního potenciometru (D_x je dekadická hodnota kroku, R_{AB} je nominální hodnota potenciometru, R_W je odpor přechodu potenciometru – 45 Ω). Na obr 1.16 je simulace závislosti nastavení digitálního potenciometru na zesílení filtru.

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_{vst} \cdot C_{vazebni}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^{13} \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 1,59 \text{ nHz} \quad (1.11)$$

$$A = 20 \cdot \log \left(1 + \frac{\frac{D_x}{256} \cdot R_{AB} + R_W}{\frac{256 - D_x}{256} \cdot R_{AB} + R_W} \right) = 20 \cdot \log \left(1 + \frac{\frac{D_x}{256} \cdot 50 \cdot 10^3 + 45}{\frac{256 - D_x}{256} \cdot 50 \cdot 10^3 + 45} \right) [\text{dB}] \quad (1.12)$$

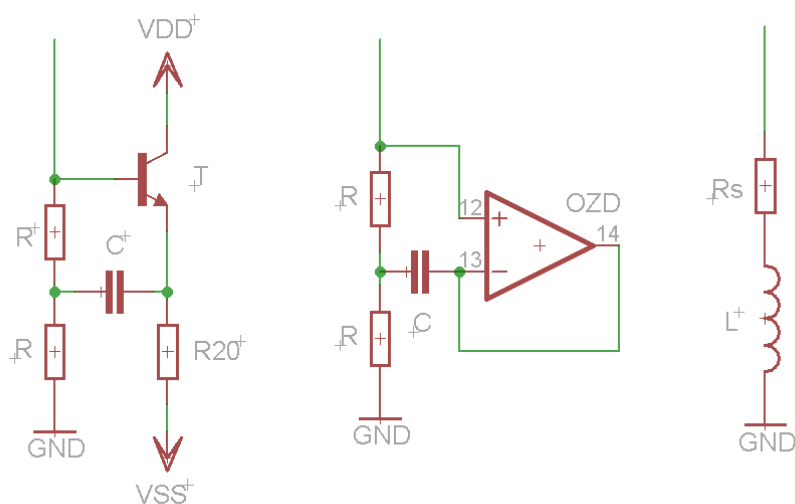


Obr. 1.16: Závislost hodnoty digitálního převodníku na skutečném zesílení předzesilovače.

1.3.3 Pětípásmový korekční zesilovač a korekční zesilovač pro LFE kanál

Pětípásmový ekvalizér slouží ke zvýraznění či potlačení některých kmitočtových pásem podle potřeby posluchače a regulaci hlasitosti. Základním prvkem toho ekvalizéru jsou syntetické induktory.

Gyrátor je obvod, který transformuje jednu impedanci v jinou - např. kapacitu na indukčnost, odpor na kapacitu apod. Nejčastější aplikací gyrátoru je právě syntetická indukčnost. V ekvalizéru je použit Prescottův syntetický induktor, což je jeden z nejjednodušších gyrátorů. Skládá se ze dvou rezistorů, kondenzátoru a zdroje napětí řízeného napětím - napěťového sledovače (viz. obr 1.17). Tento gyrátor má poměrně velký sériový odpor R_s . To způsobuje, že induktor (a tím i případný rezonanční obvod) má malou jakost. V uvedeném ekvalizéru je jakost induktoru dostatečná. Rovnice [13] a [14] popisují výpočet sériového odporu induktoru a výpočet vlastní indukčnosti.



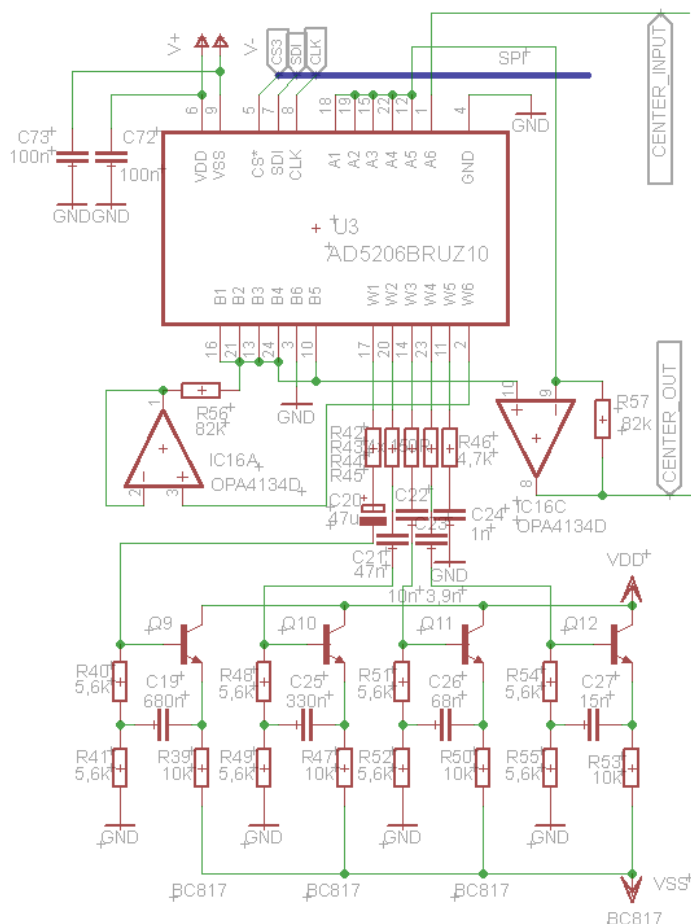
Obr. 1.17: Různá zapojení Prescottova syntetického induktoru.

$$R_s = 2 \cdot R \text{ } [\Omega] \quad (1.13)$$

$$L = R^2 \cdot C \text{ } [H] \quad (1.14)$$

Korekce je až na použití napěťových sledovačů s tranzistory v obvodu syntetických indukčností je ve zcela klasickém zapojení (viz. obr 1.18). Gyrátor s tranzistorem má mnohem menší šum než obyčejný OZ, což se projeví zvláště při maximálním zdůraznění či potlačení některého z pásem. V krajních polohách měl syntetický induktor tendenci kmitat, což je potlačeno zapojením rezistorů s odporem 150 Ohm. Kondenzátor 47 μF u regulátoru pásma 50 Hz je pouze oddělovací. V zapojení jsou použity již několikrát zmíněné operační zesilovače typu OPA4134 (detailněji popisovaného v kapitole 1.1.6). Vstupy korekčních obvodů jsou stejnosměrně vázány na obvody předzesilovače. Řízení ekvalizéru je zajištěno opět pomocí pěti kanálů ze šestikanálového digitálního potenciometru AD5206 s hodnotou 10 k Ω (detailněji popisovaného v kapitole 1.3.2). Šestý kanál je určen pro regulaci hlasitosti. Každému kanálu se nastavuje hlasitost zvlášť,

tzn. je možné tímto nastavovat vyvážení jak mezi předními tak i mezi zadními reproduktory. Tato část je napájena symetrickým napětím $\pm 2,5$ V pro digitální potenciometry, $\pm 3,9$ V pro operační zesilovače a ± 5 V pro Prescottovy inductory.

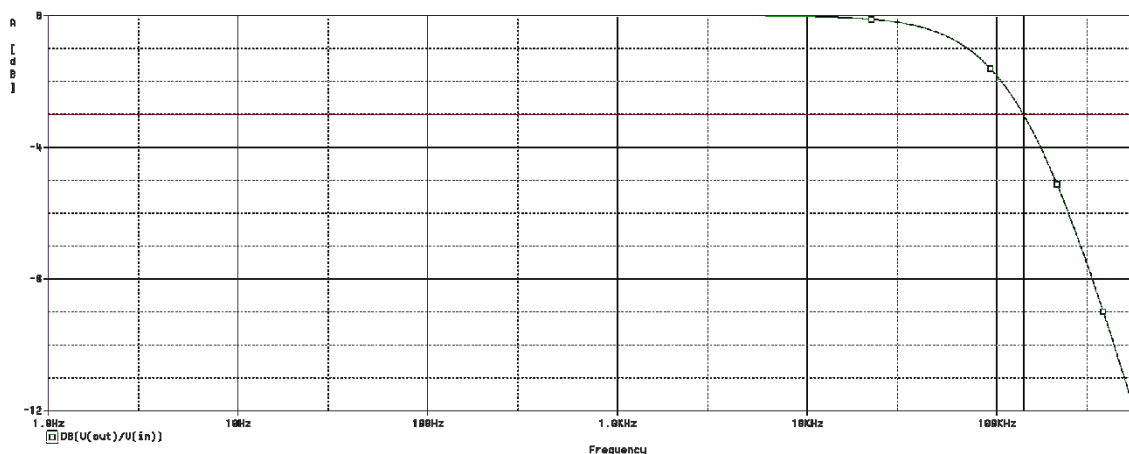


Obr. 1.18: Schéma zapojení ekvalizéru pro střenění reproduktor.

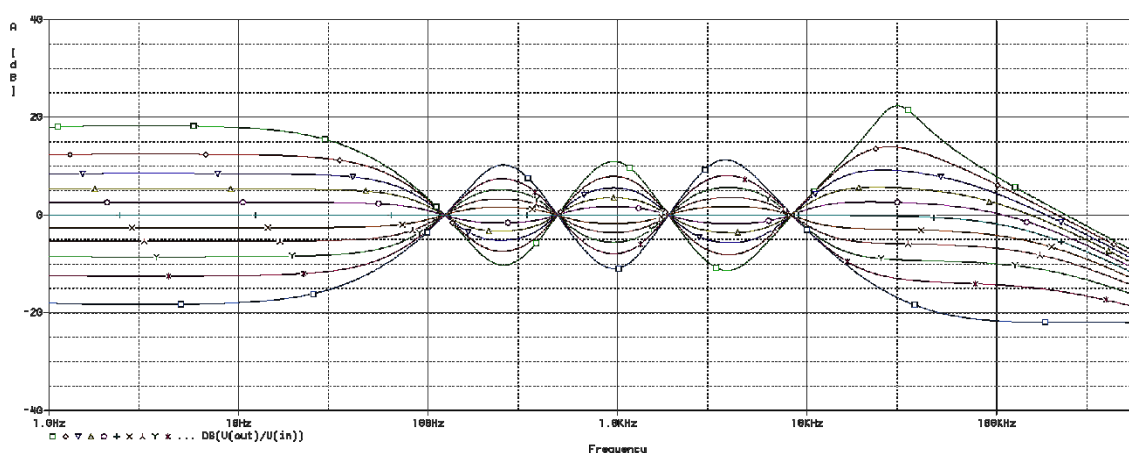
Na základě vzorců [13] a [14] byla vypočtena tabulka 1.3 kmitočtů jednotlivých pásem a vlastností jednotlivých obvodů. Na obrázcích 1.19 a 1.20 je pro ověření správnosti návrhu simulace ekvalizéru.

Pásmo	50 Hz	250 Hz	1 kHz	4 kHz	15 kHz
Ls [H]	21,32	10,34	2,13	0,47	-
fr [Hz]	5	228	1090	3700	-
Xr [kΩ]	6,7	14,8	14,6	10,9	10,6

Tab. 1.3: Tabulka vlastností korekčních obvodů pro jednotlivá pásma.



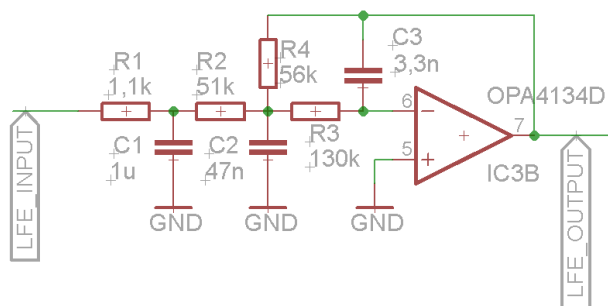
Obr. 1.19: Charakteristika ekvalizéru bez ekvalizace s vyznačeným mezním kmitočtem 138kHz.



Obr. 1.20: Charakteristika ekvalizéru pro střídavé nastavení potenciometrů 0 - 100%.

1.3.4 Dolní propust pro LFE kanál

LFE kanál je důležitou součástí každé moderní prostorové reprosoustavy (viz. kapitola 1.1.2). Tento kanál může propouštět podle normy Dolby Digital na rozdíl od ostatních kanálů pouze nízké frekvence do 150 Hz pro subwoofer. Proto na jeho realizaci byl kladen zvláštní důraz. Dolní propust je realizována jako zpětnovazební filtr - Butterworthovu dolní propust třetího řádu (viz. obr. 1.21), charakterizovanou rovnicemi [15] až [17].



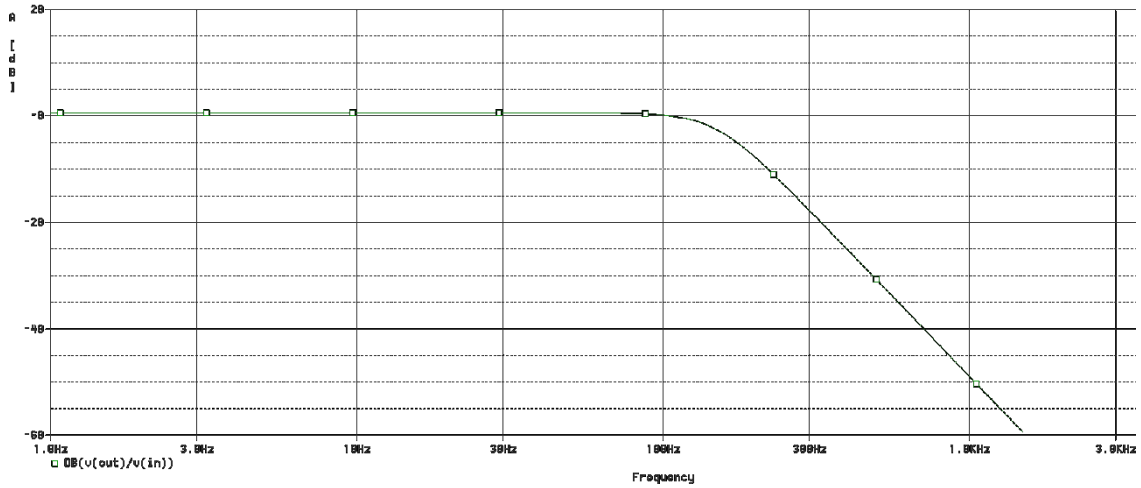
Obr. 1.21: Schéma dolní propusti 3. řádu pro LFE kanál.

$$K = -\frac{R_4}{R_1+R_2} \quad (1.15)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{2\pi \cdot f_{c1}}{s+2\pi \cdot f_{c1}} \cdot \frac{K(2\pi \cdot f_{c2})^2}{s^2+2\pi \cdot f_{c2} \cdot s+(2\pi \cdot f_{c2})^2} \quad (1.16)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}}{s^3 + s^2 \cdot \left(\frac{1}{C_1 \cdot R_1} + \frac{1}{C_1 \cdot R_2} + \frac{1}{C_2 \cdot R_2} + \frac{1}{C_2 \cdot R_3} + \frac{1}{C_2 \cdot R_4} \right) + s \cdot \left(\frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} + \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_3} + \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3} + \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_4} + \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_4} + \frac{1}{C_3 \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot R_4} \right) + \frac{R_1+R_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4}} \quad (1.17)$$

Po poněkud delším vyjádření (není v této práci rozepsáno) všech neznámých z rovnic jsme dostali následující hodnoty součástek: $C_1 = 1 \mu\text{F}$, $C_2 = 47 \text{ nF}$, $C_3 = 3,3 \text{ nF}$, $R_1 = 1,1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 51 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 130 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 56 \text{ k}\Omega$. Při zpětném dosazení nám vyšla mezní frekvence 149Hz. Simulaci filtru je možné vidět na obr. 1.22.



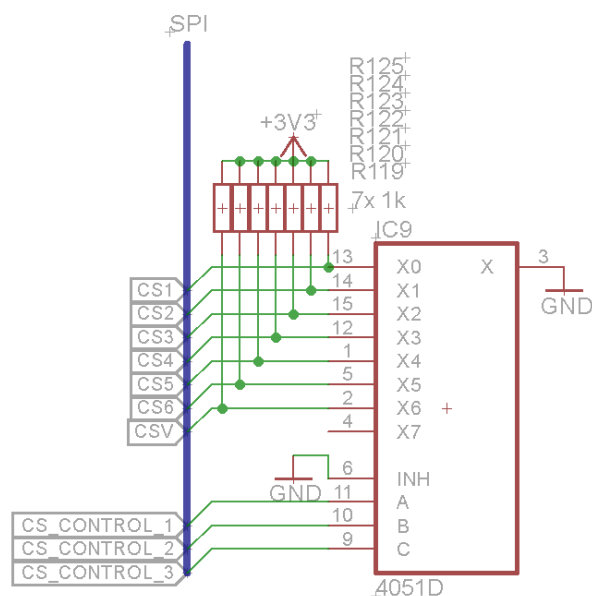
Obr. 1.22: Modulová frekvenční charakteristika filtru pro LFE kanál.

1.3.5 Řízení komunikace

Uvnitř zesilovače probíhá komunikace po sběrnicích SPI a TWI. Sběrnici TWI využívá pouze DSP a D/A převodník, s tím že každé zařízení má vlastní adresu a nepotřebuje žádné řídicí vodiče. Nicméně se sběrnicí SPI je to poněkud komplikovanější, jen v tomto bloku je sedm zařízení, které komunikují po této sběrnici a každé potřebuje kromě dvou vodičů společných vodičů ještě jeden řídicí (CS-Chip select). Tím by bylo využito velké množství portů (pinů) ovládacího mikroprocesoru. Abychom tento počet minimalizovali, byla vytvořena tato jednoduchá část. Tvoří ji jen jeden 8-mi bitový multiplexer/demultiplexer 74HC4051 od společnosti NXP a je napájen 5 V (viz. obr. 1.23). Funkce obvodu je úplně jednoduchá, z procesorové desky se na tři ovládací piny obvodu (A, B, C) přivede binární hodnota, na základě které se spojí příslušný výstup (X0-X7) se vstupem (X), detailní zapojení popisuje tab. 1.4. Výstupy jsou připojeny přes pull-up rezistory na napájecí napětí 3,3 V (pin CS je aktivní v nízké úrovni) a výstup je spojen se zemí.

Název kanálu, funkce IO	Číslo IO	Označení pinu na IO 4051
Levý přední, korekce	U1	X0
Zadní levý, korekce	U2	X1
Střední, korekce	U3	X2
Pravý přední, korekce	U4	X3
Pravý zadní, korekce	U5	X4
Subwoofer, korekce	U6	X5
Předzesilovač	U7	X6

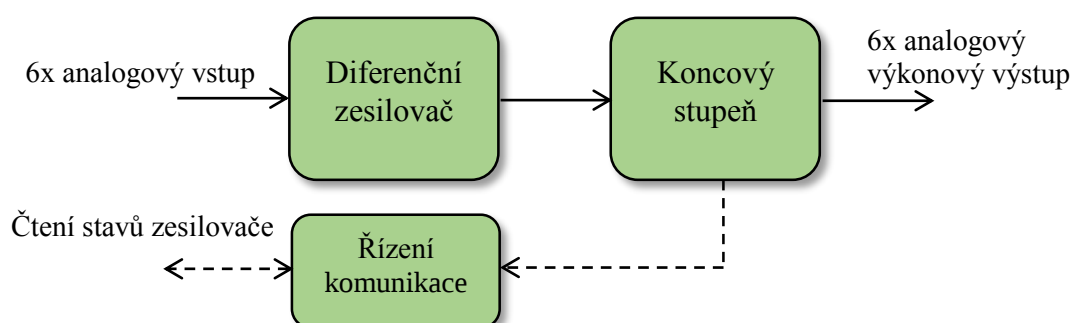
Tab. 1.4: Popis připojených obvodů k demultiplexoru 4051.



Obr. 1.23: Schéma zapojení bloku řízení komunikace.

1.4 Výkonový zesilovač

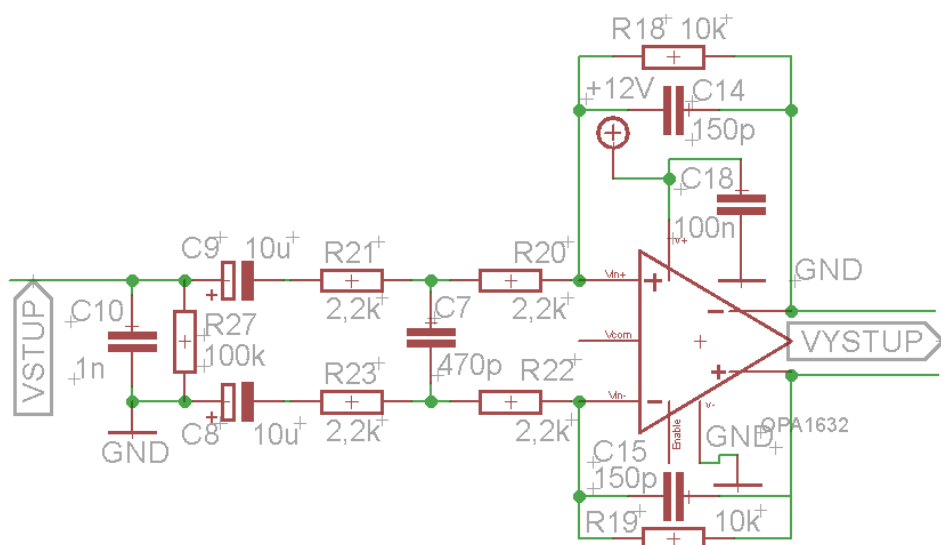
Část výkonového zesilovače je tvořena třemi základními částmi (viz. obr. 1.24), vstupním diferenčním zesilovačem, samotným koncovým stupněm a řízením komunikace.



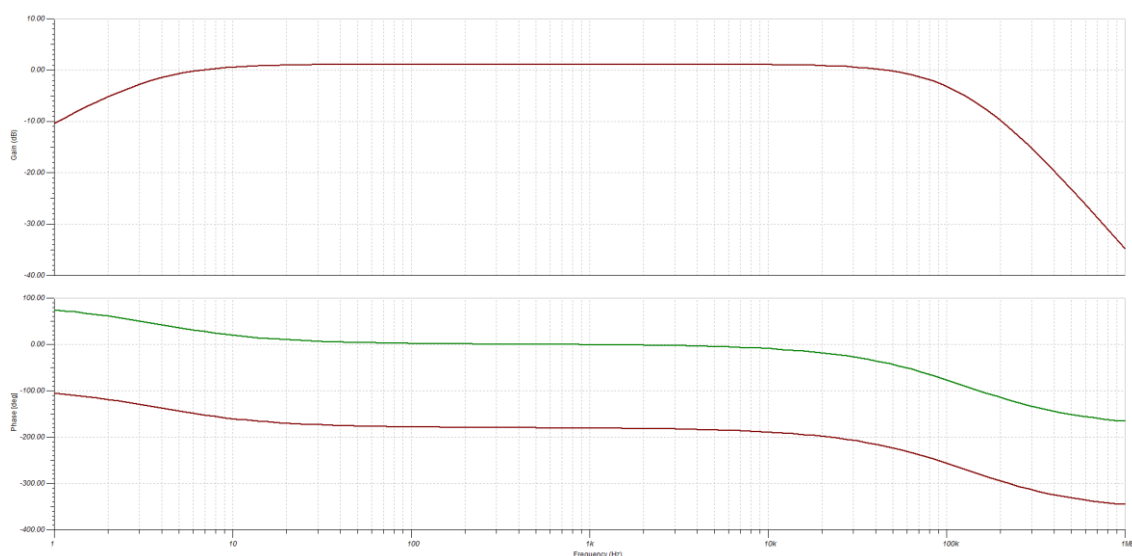
Obr. 1.24: Blokové schéma výkonového zesilovače.

1.4.1 Diferenční zesilovač

Diferenční zesilovač na obr. 1.25 tvoří v koncovém stupni dvě základní funkce. Jednak jako zdroj symetrického vstupního signálu pro výkonový stupeň a zároveň jako pásmový filtr. Zesilovač je tvořen operačním zesilovačem OPA1632 od společnosti Texas Instruments. Tento operační zesilovač má pro tuto aplikaci špičkové vlastnosti, např. THD+N 0,000022%, šum $1,3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ a šířka pásma 180 MHz. Zapojení je napájeno nesymetrickým napájením 12 V a je z obou stran odděleno vazebními kapacitami. Pásmový filtr slouží pro odfiltrování kmitočtů, které koncový stupeň nedokáže zpracovat (vyhnutí se aliasingu). Filtr má strmost 30 dB na dekádu a jeho mezní kmitočty jsou 3,5 Hz a 81,4 kHz (viz. Obr 1.26).



Obr. 1.25: Schéma zapojení diferenčního zesilovače.



Obr. 1.26: Přenosová charakteristika diferenčního zesilovače.

1.4.2 Koncový stupeň

Koncový stupeň je tvořen třemi integrovanými obvody zesilovačů TAS5630B ve třídě D. Jedná se o nejvýkonnější obvody, které v integrované podobě společnost Texas Instruments vyrábí. Mezi jeho hlavní výhody patří velmi velká účinnost více než 90%, šířka pásma větší než 80 kHz, maximální výkon při zátěži 4 Ω cca 2x300 W, odstup signál šum je více než 100 dB a celkové zkreslení THD+N je 0,03% při zátěži 1 W.

Tento obvod umožňuje pro zátěž 4 Ω různé konfigurace výkonů výstupů (1 x 400 W, 2 x 300 W, 4 x 75 W a 2 x 75 W + 1 x 300 W) v závislosti na nastavení konfiguračních bitů. Na základě zvolené konfigurace je také možné volit různou zátěž, např. při konfiguraci 1x 400 W lze použít minimální zátěž 2 Ω a dosáhnout výkonu až 600 W. V této aplikaci byla vybrána konfigurace dvojitého mostu 2 x 300 W, tzn. celkový výkon zesilovače je cca. 6 x 300 W, což je oproti zadání přiměřeně předimenzovaná hodnota. Důležité při výběru integrovaného obvodu bylo, aby při zadaném výkonu 100 W na kanál zesilovač dosahoval slušného zkreslení, v tomto případě se jedná asi o 0,07%.

Výkonové obvody koncového stupně jsou napájeny tvrdým spínaným zdrojem 50 V s maximálním proudem cca 40 A, který by měl s rezervou pokrýt spotřebu zesilovače. Na řídicí obvody je přivedeno napětí 12 V.

Obvod TAS5630 má mimo jiného velké množství různých ochran. Jedná se o ochrany proti podpětí, přehřátí, zkratu na výstupu a přetížení. Každý výkonový čip komunikuje s okolím (procesorovou deskou) a průběžně podává informace o aktuálním stavu. Z tab. 1.5 vyplývá, že některé informace jsou pouze informativního charakteru a jiné jsou o kritických chybách a zesilovač se sám z důvodu ochrany vypne a po odstranění problému je nutný restart (přivedením logické nuly a opět jedničky na pin RESET). Piny RESET jsou mezi všemi čipy spojeny, tzn. že reset se provádí vždy celého koncového stupně.

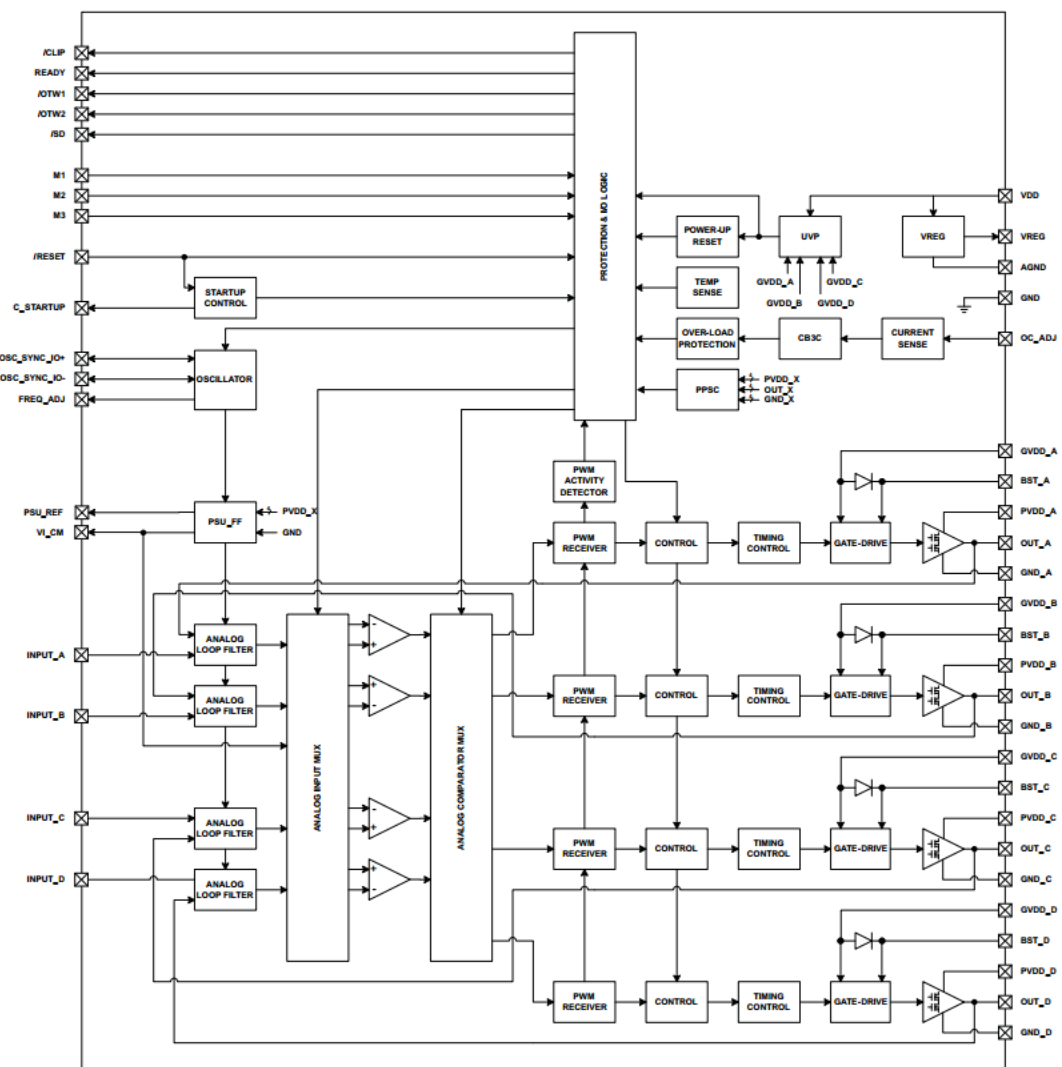
Obvod používá jako zdroj hodinového signálu vnitřní oscilátor o kmitočtu cca. 4 MHz. Připojením pinu F_ADJ přes řídicí rezistor na regulační napájení V_REG je možné tento kmitočet „programovat“ a vyhnout se tak interferencím a rušením v případě použití AM rádio přijímače v blízkosti zesilovače. V naší aplikaci tato možnost není využita.

Název pinu			Stav zesilovače
SD	OTW1	OTW2	
0	0	0	Přehřátí nebo přetížení nebo podpětí řídicího napětí
0	0	1	Přetížení nebo podpětí napájecího napětí. Upozornění, že teplota je vyšší než 100 °C.
0	1	1	Přetížení nebo podpětí řídicího napětí.
1	0	0	Upozornění, že teplota je vyšší než 125 °C.
1	0	1	Upozornění, že teplota je vyšší než 100 °C.
1	1	1	Teplota je nižší než 100 °C, žádné přetížení, žádné podpětí (normální stav)

Tab. 1.5: Stav zesilovače.

Jak již bylo okrajově zmíněno v kapitole 1.4.1 čip zesilovače má čtyři vstupy, na které se na základě aktuální konfigurace zesilovače přivádí vstupní signály. V naší konfiguraci jsou vstupy zapojeny v symetrickém zapojení, tzn. mezi vstup A a B je připojen první kanál a mezi C a D je připojen druhý kanál (viz. obr. 1.27). Toto zapojení je nutné pro správnou funkci zesilovače (zesilovače uvnitř integrovaného obvodu jsou zapojeny do mostu).

Na výstupu můstku je zařazen LC filtr 2. řádu, který signál vyfiltruje a odstraní z něj nežádoucí frekvenční složky základní nosné PWM a jejích vyšších harmonických. Ty by totiž jinak byly vyzařovány reprojekabely jako anténou do širokého okolí a mohly by rušit provoz ostatních zařízení. LC filtr je naladěn na kmitočet 100 kHz. Teoreticky by stačila vzorkovací frekvence PWM modulační pouze větší než dvojnásobek nejvyšší přenášené frekvence (splnění Shannonova teoremu) vstupního signálu, ale právě s ohledem na omezenou strmost výstupních filtrů se volí frekvence PWM řádově vyšší, běžně 100 - 1000 kHz, v našem případě je to konkrétně 400 kHz.



Obr. 1.27: Vnitřní struktura obvodu TAS5630 (převzato z [3]).

1.4.3 Řízení komunikace

Řízení komunikace je velmi důležitá část koncového stupně zesilovače, neboť bez ní by nebylo možné sledovat stav zesilovače (viz. obr. 1.28). Tato část má za úkol dvě zásadní funkce. Za prvé jako oddělení od obvodů koncového stupně, napěťové úrovně na pinech OTW1, OTW2, SD, READY a CLIP jsou plně dostačující (3,3 V), ale nechceme obvod zbytečně zatěžovat a zároveň jej ochránit před případným zkratem v jiných částech zesilovače. Proto jsou výstupní piny připojeny na tranzistory MOS-FET, které toto zajistí. Druhým neméně podstatným úkolem je multiplexování stavů pomocí dvojice multiplexorů CD4051 do dvojice datových vodičů připojených k procesorové desce (viz. tab 1.6). Toto řešení bylo zvoleno opět jako v kapitole 1.3.5 z důvodu ušetření pinů na procesorové desce a také aby skříň zesilovače nebyla plná kabeláže. Tato část je napájena kompletně napětím 3,3 V.

Logické úrovně na vstupních pinech multiplexorů			Hodnota na vstupních pinech v desítkové	Multiplexor IC1 - výstup [název pinu- č. IO]	Multiplexor IC2 - výstup [název pinu- č. IO]
ADD_0	ADD_1	ADD_2		STAT_0	STAT_1
0	0	0	0	SD - U\$5	CLIP - U\$6
0	0	1	1	OTW2 - U\$5	READY - U\$6
0	1	0	2	OTW1 - U\$5	SD - U\$9
0	1	1	3	CLIP - U\$5	OTW2 - U\$9
1	0	0	4	READY - U\$5	OTW1 - U\$9
1	0	1	5	SD - U\$6	CLIP - U\$9
1	1	0	6	OTW2 - U\$6	READY - U\$9
1	1	1	7	OTW1 - U\$6	***TEST**-log. 0

Tab. 1.6: Tabulka multiplexování stavových signálů.

jako vstupně výstupní. Schéma zapojení procesorové desky je v příloze A21. Dále následuje mapa pinů tab. 1.7 a 1.8, podle které se dá určit, jak jsou jednotlivé piny připojeny k ostatním deskám zesilovače. Ve finálním výrobku je počítáno s tím, že řídicí deska bude nacvaknutá na pinech desky DSP a korekcí.

Mapa pinů a propojek odkud - kam					
Odkud			Kam		
Název desky	Označení konektoru	Č. pinu MCU	Název desky	Označení konektoru	Název pinu
MCU DESKA	X1-1	61	ZESILOVAČ	X1-1	ADD_2
	X1-2	60		X1-2	ADD_1
	X1-3	59		X1-3	ADD_0
	X1-4	58		X1-4	RESET
	X1-5	57		X1-5	STAT_1
	X1-6	56		X1-6	STAT_0
MCU DESKA	X2-1	51	KOREKCE – SBĚRNICE SPI	X4-1	CS_CONTROL_3
	X2-2	50		X4-2	CS_CONTROL_2
	X2-3	49		X4-3	CS_CONTROL_1
	X2-4	11		X4-4	SDI
	X2-5	12		X4-5	CLK
	X2-6	48		X4-6	DIGITAL/ANALOG
	X2-7	47		X4-7	SPDIF/TOSLINK
MCU DESKA	X6-1	GND	PŘEDNÍ PANEL	X1-1	GND
	X6-2	4		X1-2	LED_GREEN
	X6-3	5		X1-3	LED_RED
	X6-4	27		X1-4	KODER_RIGHT
	X6-5	28		X1-5	KODER_LEFT
	X6-6	6		X1-6	KODER_SWITCH
MCU DESKA	X2-1	42	KOREKCE – SBĚRNICE TWI	X5-1	ZERO1
	X2-2	41		X5-2	ZERO2
	X2-3	40		X5-3	PTSB
	X2-4	39		X5-4	IRQB
	X2-5	38		X5-5	HRSTB
	X2-6	25		X5-6	SCLKI2C
	X2-7	26		X5-7	SDAI2C

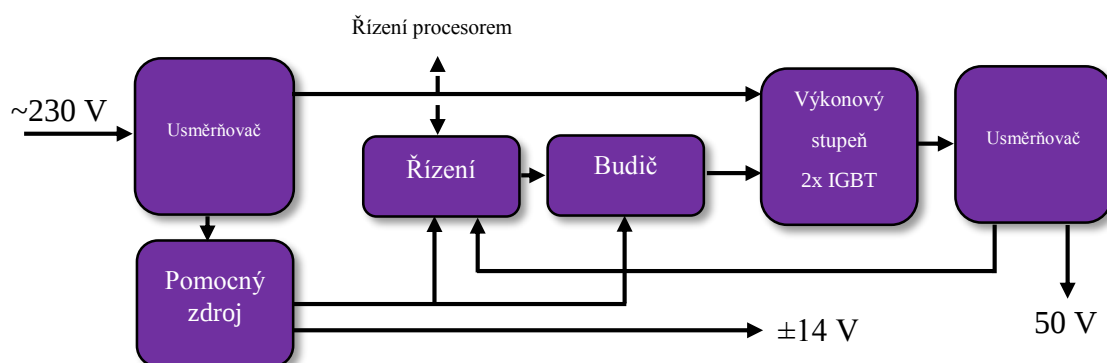
Tab. 1.7: Mapa řídicích pinů a propojek v zesilovači.

Mapa pinů a propojek odkud – kam (pokračování)					
Odkud			Kam		
Název desky	Označení konektoru	Č. pinu MCU	Název desky	Označení konektoru	Název pinu
MCU DESKA	X4-1	VCC +3,3V	PROGRAMOVACÍ KONEKTOR ISP/UART		VCC +3,3V
	X4-2	GND			GND
	X4-3	13			MISO
	X4-4	12			MOSI
	X4-5	11			SCK
	X4-6	20			RESET
	X4-7	2			TxD
	X4-8	3			RxD
MCU DESKA	X7-1	7	ZDROJ	X1-1	OVERLOAD
	X7-2	GND		X1-2	GND
	X7-3	8		X1-3	STANDBY
	X7-4	GND		X1-4	GND
MCU DESKA	X5-1	13	TFT LCD	X1-1	MISO
	X5-2	29		X1-2	BLACKLIGHT
	X5-3	11		X1-3	SCK
	X5-4	12		X1-4	MOSI
	X5-5	45		X1-5	DATA/COMMAN D
	X5-6	30		X1-6	RESET
	X5-7	44		X1-7	CS
	X5-8	VCC +3,3 V		X1-8	VCC +3,3V
	X5-9	GND		X1-9	GND

Tab. 1.8: Mapa řídicích pinů a propojek v zesilovači (pokračování).

1.6 Napájecí zdroj

Napájecí zdroj pro zesilovač je jednou z nejdůležitějších komponent celého přístroje. Jeho parametry zásadně ovlivňují jakost zesilovače, protože při špatném návrhu a špatné filtraci může zdroj rušit jak analogové cesty zesilovače, tak i okolní přístroje nebo případně mít neúměrně velký ztrátový výkon. Konstrukce na obr. 1.30 je navržena v topologii jednočinného propustného zdroje se dvěma spínači s pomocným napájecím zdrojem. Tato koncepce zajistí požadovaný výkon 1,8 kW, tj. vstupní napětí 50 V při cca 40 A a z pomocného zdroje symetrické napětí 17 V pro nízko výkonovou část. Při přetížení zdroje, zdroj automaticky přechází do tzv. proudového režimu. Komunikace s okolím je zajištěna přes galvanicky oddělený výstup, je možné monitorovat přetížení zdroje (proudový režim) a zapínat nebo vypínat zdroj.



Obr. 1.30: Blokové schéma napájecího zdroje.

1.6.1 Vstup zdroje a usměrňovač

Zdroj používá tranzistory IGBT a je řízen obvodem UC3845. Síťové napětí prochází nejprve odrušovacím filtrem. Poté je usměrněno můstkem a filtrováno na kondenzátorech. Z důvodu omezení proudového nárazu při zapnutí přístroje je v cestě zapojen obvod soft-start, který může být tvořen termistorem NTC nebo obvodem soft-start. V našem případě je použití NTC termistoru vyloučeno, protože na výkony, které požadujeme, se nevyrábí.

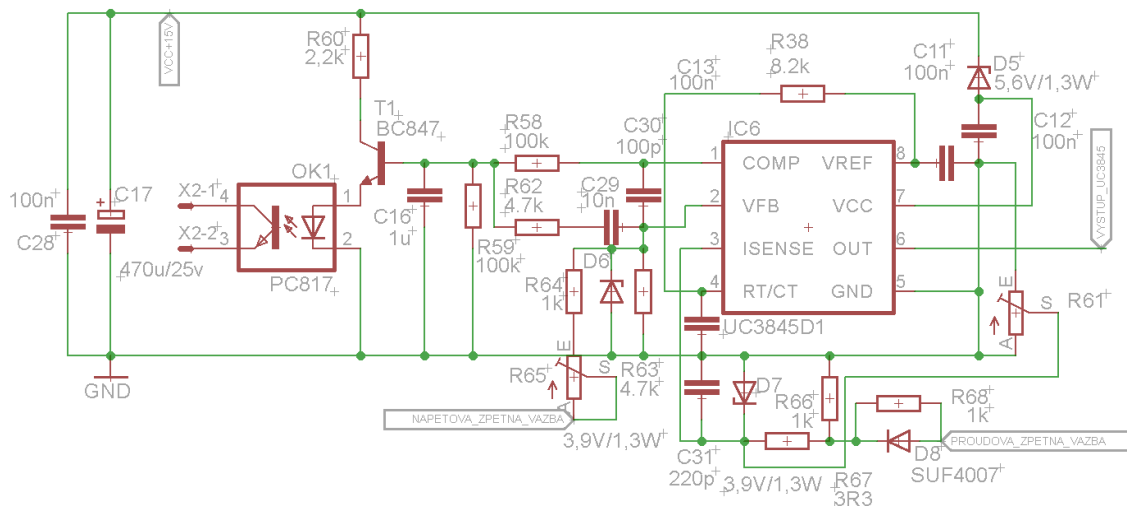
1.6.2 Pomocný zdroj

Jako pomocný zdroj je v zapojení použit průmyslový zdroj NFM-20-12 od společnosti Mean Well, s výstupním napětím 12 V. Nicméně konstrukce pomocného zdroje byla mírně modifikována změnou odporového děliče zpětné vazby. Tím bylo dosaženo zvýšení výstupního napětí z 12 V na 17 V. Dále je zdroj doplněn měničem a kaskádou stabilizátorů napětí.

1.6.3 Řídicí obvod

Řídicí obvod UC3845 na obr. 1.31 má na výstupu frekvenci 50 kHz a maximální střidu 47%. Je napájen přes zenerovu diodu, která snižuje napájecí napětí obvodu o 5,6 V (na 9,4 V) a tím posouvá interval napětí, kdy obvod pracuje z 7,9 V a 8,5 V na

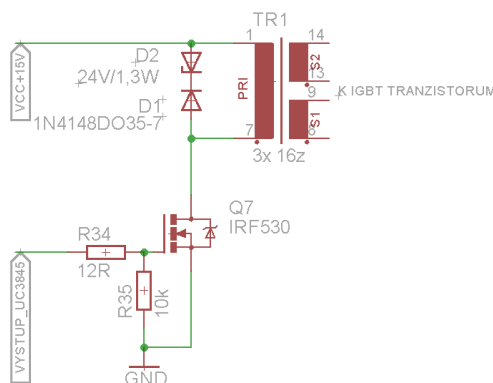
13,5 V a 14,1 V. Výkonový zdroj se může rozběhnout za předpokladu, že napájecí napětí pomocného zdroje je alespoň 14,1 V a v případě kolísání napětí se zdroj sám vypne, pokud napětí klesne pod 13,5 V. Toto řešení chrání dvojici výkonových tranzistorů IGBT před desaturací a nevratným poškozením.



Obr. 1.31: Schéma řídicí části napájecího zdroje.

1.6.4 Budič výkonového stupně

Výstupní obdélkový signál ovládá tranzistor MOS-FET, který řídí propustný budič transformátor (GDT transformátor – viz. obr. 1.32). To řešení zajišťuje galvanické oddělení řídicí části a plovoucí buzení.



Obr. 1.32: Schéma budiče výkonového spínače zdroje.

1.6.5 Výkonová spínací část zdroje

Jak již bylo v úvodu kapitoly zmíněno, zdroj je koncepčně řešen jako jednočinný propustný zdroj se dvěma spínači. Tento typ zdroje využívá zásadně transformátor bez vzduchové mezery v propustné půlperiodě a díky tomu se hodí pro zdroje nad 100 W do 10 kW. Blokujiící půlperioda je rekuperována. Výkonový transformátor zde neslouží jako zásobárna energie, je nutné použít výstupní tlumivku. Horní dioda usměrňovače slouží k usměrnění propustné půlperiody, dolní dioda přebírá proud tlumivky, když je na sekundárním vynutí záporné napětí (blokujiící půlperioda). Střída buzení musí být vždy

menší než 50%. Tato koncepce se nejčastěji vyskytuje ve výkonových zdrojích a svářecích invertorech.

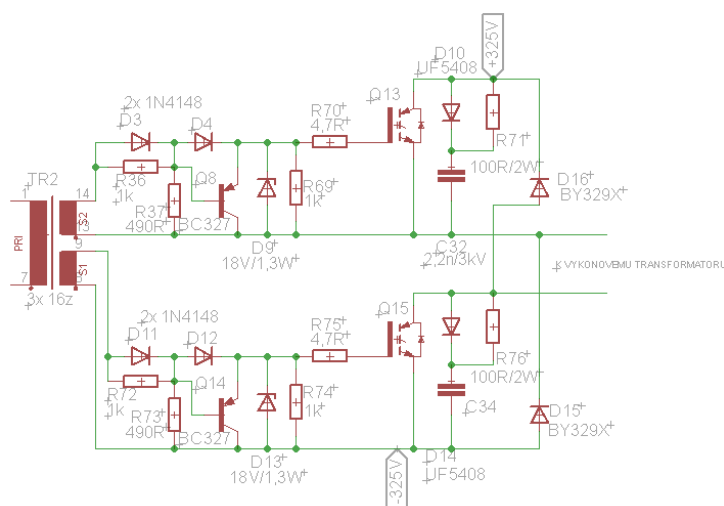
Výhody:

- Zapojení má výhodu v přímé rekuperaci bez pomocného vinutí či tlumivky
- Na tranzistorech nikdy není vyšší napětí, než je vstupní, tzn. není nutné použít tranzistory na několika násobné napětí.

Nevýhody:

- Je nutné budít plovoucí gejt tzn. nutnost použít GDT transformátor.
- Nutnost použití rekuperace, na ochranných diodách nebo na CRD článku se ztrácí nezanedbatelný výkon.
- Špičkové napětí na sekundárním vynutí, při propustné půlperiodě musí být mnohem vyšší než výstupní usměrněné napětí (alespoň 4x, protože je nutno počítat nejen se stabilizační rezervou, kvůli které se volí napětí alespoň 2x vyšší, ale také s omezením maximální délky propustného pulzu většinou do 50%). Z toho důvodu se příliš nehodí pro velká výstupní napětí.

Za GDT transformátorem následují tvarovací obvody tvořené dvojicí tranzistorů a dvojice tranzistorů, které budí výkonové IGBT tranzistory (viz. obr. 1.33). Ty poté spínají usměrněné síťové napětí (325 V) do výkonového transformátoru. Jeho výstup je poté usměrněn propustným usměrňovačem a vyhlazen tlumivkou a baterií kondenzátorů. Napěťová zpětná vazba je zavedena z výstupu do 2. vývodu UC3845. Zdroj má pevně nastavené výstupní napětí i maximální výstupní proud, který snímá proudový transformátor u výkonového transformátoru.



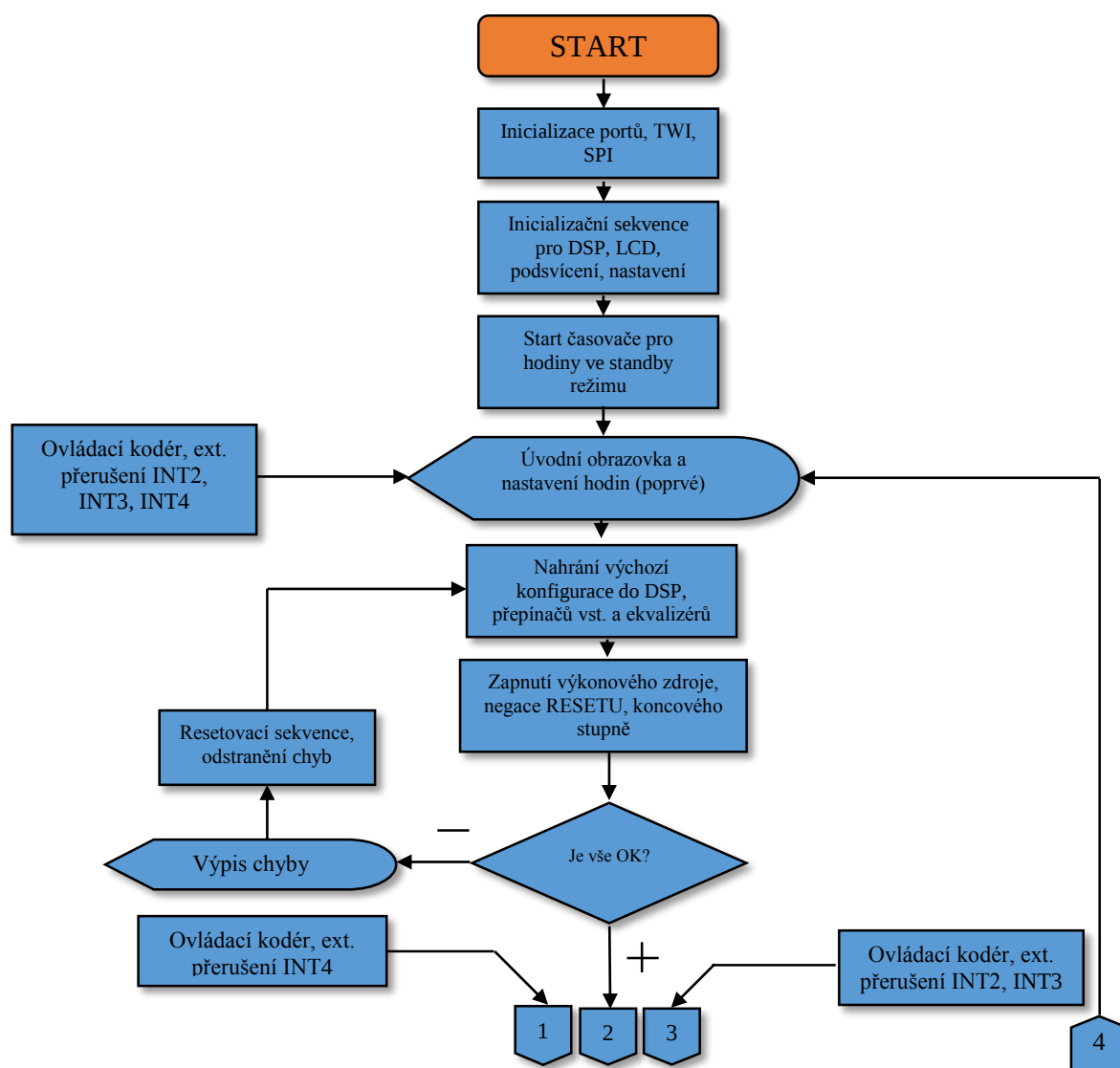
Obr. 1.33: Schéma výkonového stupně zdroje.

2 ŘÍDÍCÍ PROGRAM

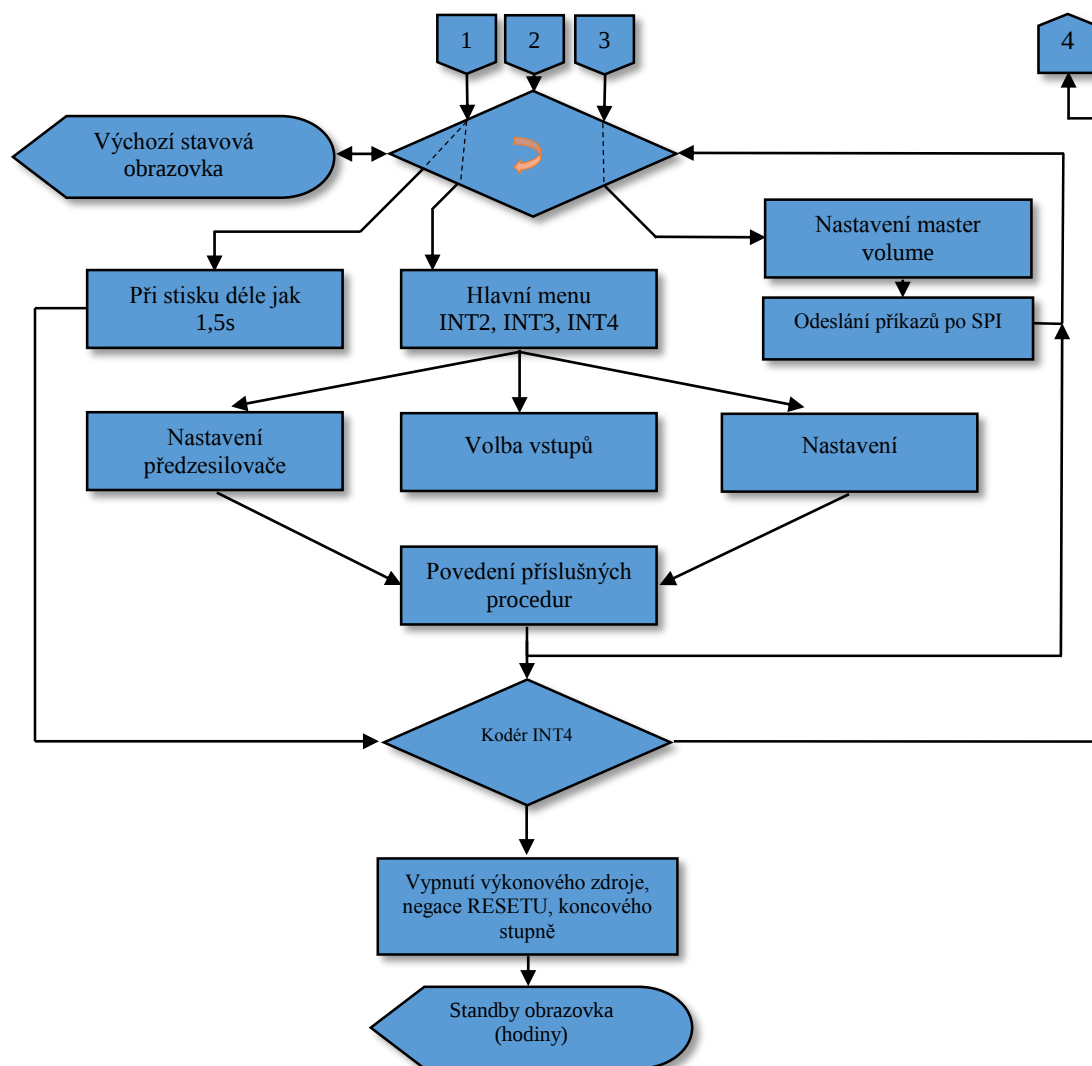
Řídicí program neboli firmware procesoru je nezbytnou součástí celého zařízení. Tvoří prostředníka mezi uživatelem a obvodem zesilovače. Jeho hlavní funkcí je chránit koncový stupeň před poškozením, ovládat a monitorovat výkonový zdroj a na základě uživatelského nastavení ovládat DSP a ekvalizér. Jak ji bylo zmíněno v kapitole 1.5 grafický výstup je interpretován uživateli pomocí barevného grafického LCD.

2.1 Vývojový diagram

Na základě použitých součástek a znalostí z programování byl vytvořen vývojový diagram programu pro mikrokontrolér na obrázcích 2.1 a 2.2.



Obr. 2.1: Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér.



Obr. 2.2: Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér (pokračování).

2.2 Čtení stavu koncového stupně

Čtení signalizačních stavů z koncového stupně je důležité z pohledů chlazení a chybových stavů, které mohou nastat při činnosti zařízení (viz. kapitola 1.4.2). Čtení probíhá tak, že se v MCU na pinech PF0 až PF2 (piny 61 až 59) nastavují binární hodnoty podle tabulky 1.6 a na pinech PF4 a PF5 (piny 56 a 57) se čte logická úroveň, která odpovídá logickým hodnotám na jednotlivých stavových pinech obvodů koncového stupně (viz tabulky 1.5 a 1.6). V následujícím zdrojovém kódu je finální realizace funkce, která čte stavy koncového stupně.

```

int stavy (void)
{
    DDRF=0x0F; //nastavení PF0 až PF3 jako výstup, ostatní jako vstup
    PORTF |= (1<<PF4) | (1<<PF5); //zapnutí pull-up rezistorů
    for(int add=0; add<=7; add++) //smyčka čítající 0 až 7
    {
        PORTF=add; //nastavení adresy na PORTF, ze které se bude číst
        _delay_ms(5); //zpoždění 5 ms

        if(add<=4) //uložení invertovaných hodnot do globálních proměn.
            if((PINF&(1<<PF5))==0) stat1|=(1<<add);

        if((add>=2) | (add<=6))
            if((PINF&(1<<PF4))==0) stat3|=(1<<(add-2));

        if((add>=5) & ((add<=1)))
        {
            if((PINF&(1<<PF5))==0) stat2|=(1<<(add-5));
            if (add<=1)
                if((PINF&(1<<PF4))==0) stat2|=(1<<(add+3));
        }
    }
    return 0;
}

```

2.3 Komunikace po SPI a obsluha chip select

SPI sběrnice je v zesilovači nejpoužívanější komunikačním prostředkem, využívá ho 7 digitálních potenciometrů, LCD displej a čtečka paměťových karet. Digitální potenciometry využívají multiplexování chip selectu (viz kapitola 1.3.5) Z tohoto důvodu byla vytvořena speciální funkce ve zdrojovém kódu, která usnadňuje práci s digitálními potenciometry a zároveň značně zjednodušuje zdrojový kód. Obsluha chip select displeje a čtečky SD karet je řešena zvlášť.

```

int SPIpot_zapis(unsigned int IO, unsigned int kanal, unsigned int
hodnota)
{
    DDRA=0x1F; //nastavení PA0 až PA4 jako výstup, ostatní jako vstup
    PORTA=IO; //nastavení příslušného CS do LOW, viz tab. 1.4
    if (IO==5) spi_send(0);
    else spi_send(kanal-1); //odeslání adresy kanálu digi. potenciometru
    spi_send(hodnota); //odeslání dat do digi. potenciometru
    PORTA=0x07; //nastavení CS do HIGH
    return 0;
}

```

V tabulce 2.1 je znázorněná výchozí konfigurace zesilovače.

Parametr	Výchozí stav
Výkonový zdroj	OFF
Výkonový zesilovač	v RESETU
Přepínač vstupů	digitální vstup
Přepínač digitálních vstupů	TOSLINK
Pásmo ekvalizéru	všechny 0 dB
Master volume	maximálně ztišeno
Předzesilovač	všechny kanály 1,3 dB
Volume D/A převodníku	100% - 5 dBu

Tab. 2.1: Výchozí konfigurace zesilovače.

3 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

Celé zařízení se skládá dohromady ze šesti desek plošných spojů, které zahrnují jednotlivé funkční bloky popsané v předchozích kapitolách. Celý výrobek je umístěn ve stíněném dřevěném boxu.

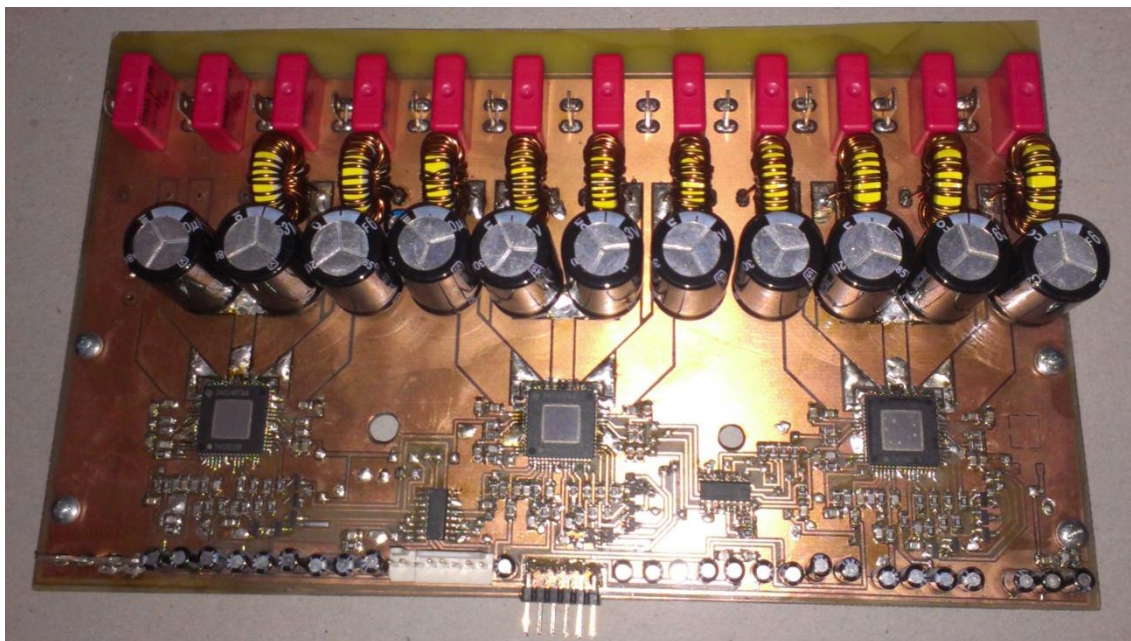
3.1 Konstrukce koncového stupně

Konstrukce koncového stupně je realizována na oboustranné desce plošných spojů o rozměrech 209 x 112 mm (viz. obr. 3.1). Při návrhu DPS bylo počítáno s místem pro dostatečně velký chladič (viz. obr. 3.2). Chladič má rozměry 209 x 46 mm a tepelný odpor 1,3 K/W. Toto chlazení musí být schopno odvést při maximální zatížení asi 160 W tepla, což samo o sobě není možné tímto chladičem realizovat. Proto je chladič doplněn dvojicí 40 mm ventilátorů, kterým jsou z procesorové desky řízeny otáčky a jsou aktivní, pouze když některý z čipů překročí teplotu 80 °C. Druhou hlavní funkcí chladiče je spojení chladičích plošek čipů (thermal padů) se zemí. Tím se snižuje celková impedance země a neméně důležitým faktem je stínění integrovaných obvodů před rušením.

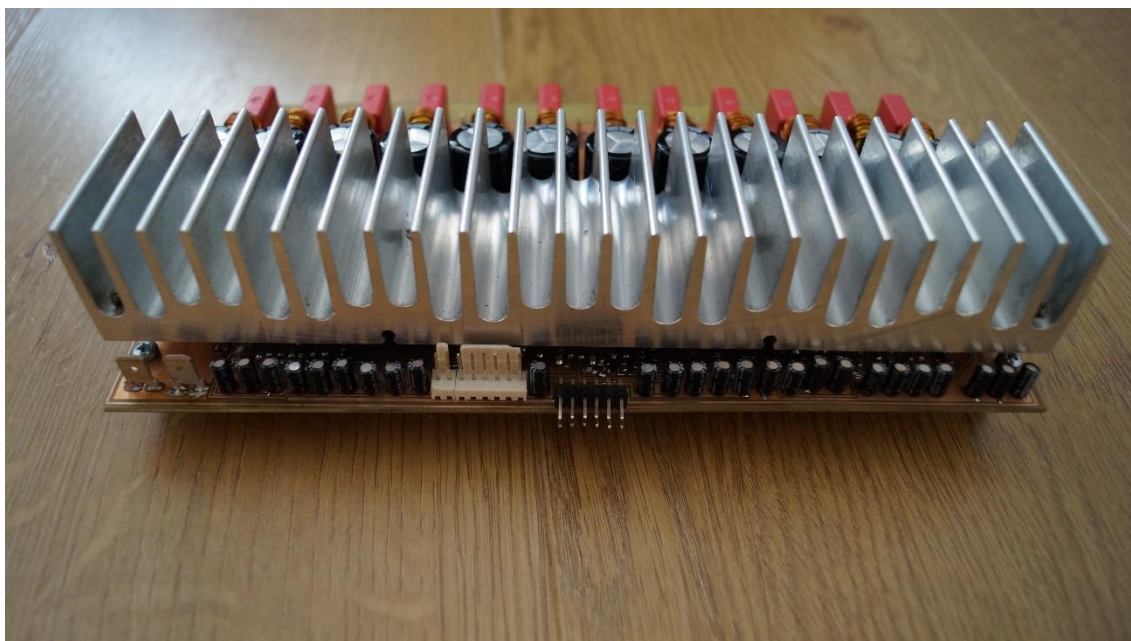
Dalším důležitým prvkem zajišťující korektní funkci jsou blokovací kondenzátory, které musí být umístěny co nejbližší daných pinů integrovaného obvodu. Tyto kondenzátory jsou umístěny pod každým z výkonových čipů. Baterie dvanácti elektrolytických kondenzátorů (viz. obr. 3.3) by měla být na vyšší teplotu 105 °C, z důvodu vyššího teplotního namáhání a je dobré, aby měly označení „low ESR“ (nízký sériový odpor a indukčnost). V prototypu zesilovače jsou použity úplně obyčejné kondenzátory na 85 °C, bohužel je to na nich znát, při delším zatížení zesilovače jsou kondenzátory vlažné.

Posledním důležitým a pravděpodobně nejkritičtějším faktorem na kvalitu reprodukce a na zatížitelnost zesilovače má výstupní filtr. Tento filtr nemá funkci, jak by se na první pohled mohlo zdát, dolní propusti pro odfiltrování vzorkovacího kmitočtu na cca 400 kHz (tento kmitočet reproduktor stejně nezahraje a není slyšitelný), ale jeho hlavní funkcí je snížit vyzařování přívodním kabelem k reproduktorům co nejvíce z integrovat výstupní PWM modulaci a tlumit tak zpětné rázy způsobené vlastní

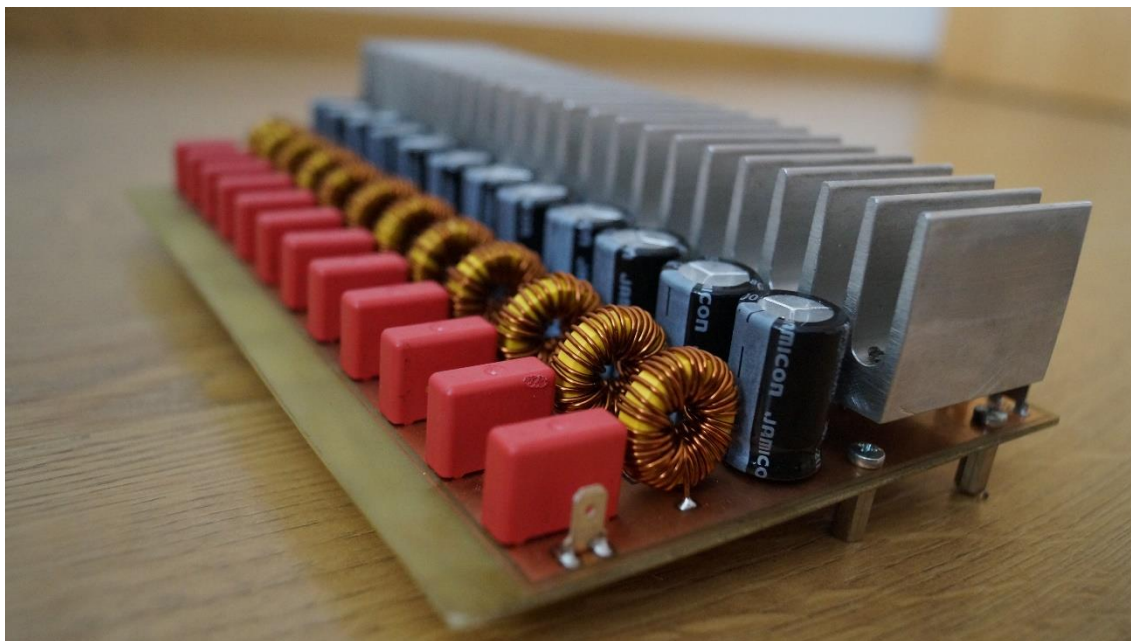
indukčností reproduktorů při prudké změně polarity. V prototypu byly použity toroidní železoprachové výstupní tlumivky, které plně dostačují svému účelu. V případě použití integrovaného obvodu TAS5630 v jiné konfiguraci pro vyšší výkony (např. 1 x 400 W) je nutné nahradit toroidní železoprachová jádra filtru např. hrníčkovými feritovými jádry, jinak hrozí poškození obvodu zpětnými rázy.



Obr. 3.1: Prototyp koncového stupně – během osazování bez chladiče.



Obr. 3.2: Prototyp koncového stupně – pohled ze předu.



Obr. 3.3: Prototyp koncového stupně – pohled zezadu.

Výkresová dokumentace této části se nachází v přílohách: A1 - schéma zapojení, A2 a A3 - předlohy pro výrobu DPS, A4 a A5 - osazovací výkres DPS a B1 - seznam použitých součástek. Výsledky měření této části se nachází v příloze C.

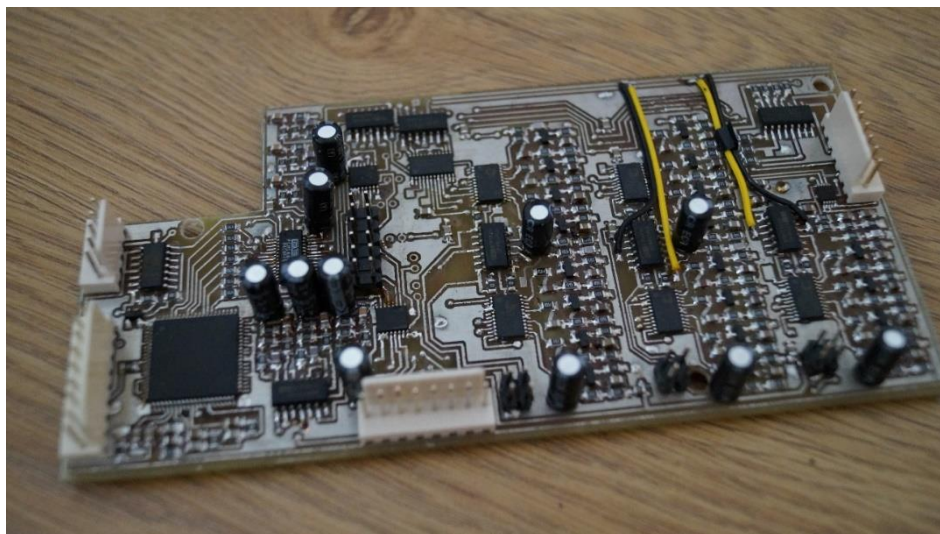
3.2 Konstrukce korekční části

Korekční část zesilovače je deska s největší hustotou součástek (obsahuje 19 integrovaných obvodů), proto byla navržena jako dvoustranná deska o rozměrech 139 x 67 mm. Díky složitosti této části, deska bohužel obsahuje sedm drátových propojek (viz obr. 3.4), které byla snaha opakovaným návrhem odstranit, nicméně se to zcela nepodařilo. Signálové cesty, které jsou řešeny drátovými propojkami, jsou vedeny kabely s kvalitním stíněním a v porovnání s případným zvětšením DPS a vyvarování se drátových propojek toto řešení vychází s ohledem na šumové parametry a přeslechy mnohem lépe.

V levé části DPS (viz obr. 3.4) se nachází obvody pro zpracování digitálního signálu S/PDIF, TOSLINK a řídicí konektor pro sběrnici TWI. Ve střední části desky jsou přepínače mezi digitálním a analogovým vstupem, konektor pro analogový vstup a napájení. V pravé části se nachází 5 pěti pásmových ekvalizérů, dolní propust pro šestý efektní kanál a řídicí konektor pro sběrnici SPI, která ovládá analogovou část korekční části. Konektor pro výstupní analogový signál byl rozdělen z důvodu optimalizace velikosti desky do trojice konektorů.

Tato deska jako jediná není v konstrukčním boxu připevněná pomocí šroubků, ale je nacvaknutá na plastových příchýtkách.

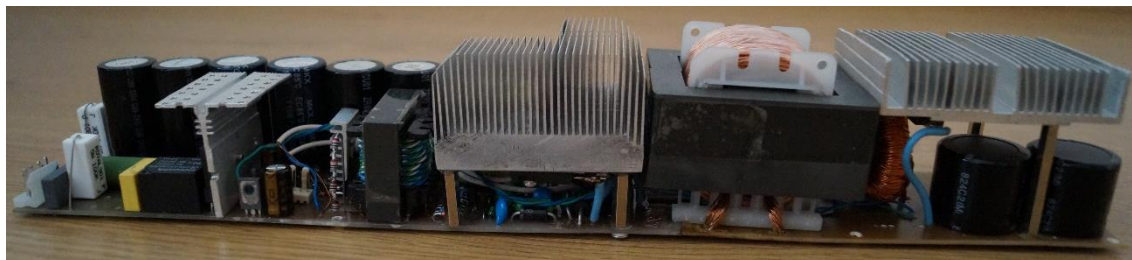
Výkresová dokumentace této části se nachází v přílohách: A6 - schéma zapojení, A7 a A8 - předlohy pro výrobu DPS, A9 a A10 - osazovací výkres DPS a B2 - seznam použitých součástek. Výsledky měření této části se nachází v příloze D.



Obr. 3.4: Prototyp korekční části - během osazování.

3.3 Konstrukce výkonového napájecího zdroje

Napájecí zdroj popisovaný v kapitole 1.6 je vyroben na jednostranné desce plošných spojů o rozměrech 381 x 66 mm. Celý zdroj byl navrhován s důrazem na co největší prostorovou optimalizaci a zároveň pro možnost účinného chlazení. Na obrázcích 3.5 a 3.6 jsou fotografie prototypu zdroje.



Obr. 3.5: Prototyp výkonového zdroje – pohled z boku.



Obr. 3.6: Prototyp výkonového zdroje – pohled ze shora.

Na levé straně desky zdroje jsou konektory pro síťové napájení a síťový vypínač. Dále se na desce nachází směrem doprava obvody soft-start a pod prvním menším chladičem je usměrňovací můstek 600 V/25 A. Ve spodní střední části desky jsou řídicí obvody a přes GDT transformátor, který je navinut trifilárně 15 závitů na feritovém EI s průřezem středního sloupku 100 mm², je budicí signál přiveden do výkonové části

zdroje. Tato část se nachází pod masivním chladičem uprostřed desky, tvoří ji kromě tvarovacích a výkonových obvodů zmíněných v kapitole 1.6.5 navíc proudový transformátor, který tvoří proudovou zpětnou vazbu zdroje a umožňuje nastavení proudového omezení (a tím jsou také chráněny výkonové součástky před přetížením).

Výkonový transformátor je tvořen masivním EE jádrem o průřezu středního sloupku 683 mm^2 . Vynutí transformátoru prokládané, nejprve je navinuto primární vynutí a následně sekundární. Primární vynutí je realizováno svazkem 27 vodičů s průřezem $0,35 \text{ mm}^2$, kterým je navinuto 20 závitů. Sekundární vynutí, tvoří 14 závitů navinutých svazkem 30ti vodičů s průřezem $0,5 \text{ mm}^2$.

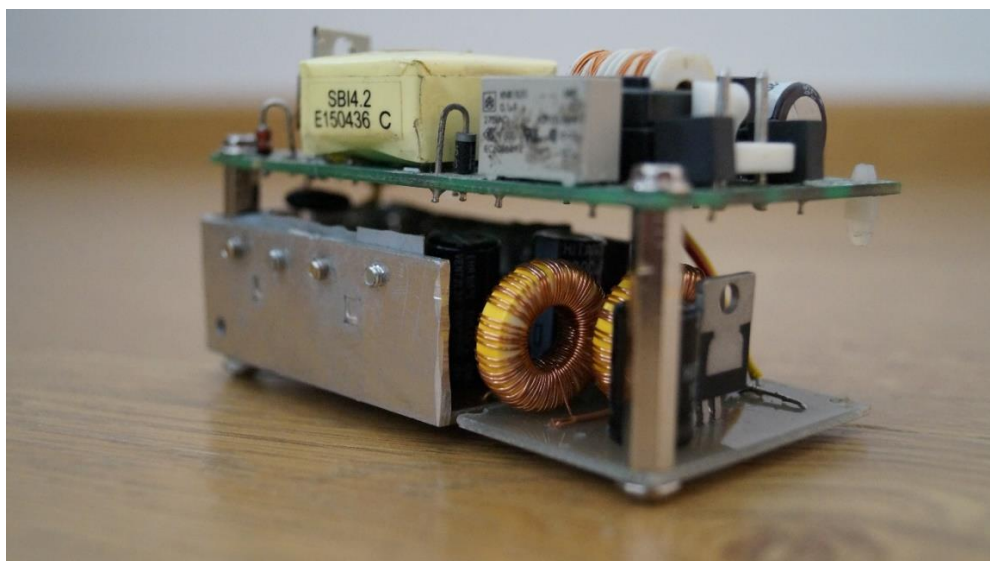
Poslední částí zdroje je výkonový usměrňovač a obvod rekuperace, který je pod chladičem na pravé straně desky DPS na obrázku 3.6.

Výkresová dokumentace této části se nachází v přílohách: A11 - schéma zapojení, A12 a A13 - předlohy pro výrobu DPS, A14 a A15 - osazovací výkres DPS a B3 - seznam použitých součástek. Výsledky měření této části se nachází v příloze E.

3.4 Konstrukce pomocného napájecího zdroje

Pomocný zdroj je realizován kombinací průmyslového spínaného zdroje značky MeanWell, invertoru a lineárních stabilizátorů. Prototyp desky pomocného zdroje je se spínaným zdrojem spojen pomocí distančních sloupků do jednoho kompaktního celku (viz obr. 3.7). Chlazení lineárních stabilizátorů zajišťuje dvojice hliníkových destiček o ploše 60 cm^2 . Při oživování konstrukce se vyskytl problém s rozběhnutím spínaného zdroje při tvrdých startech, a proto byl zdroj doplněn NTC termistorem, který minimalizuje proudovou špičku při spuštění zdroje. Lineární stabilizátory včetně invertoru jsou na jednostranné desce plošných spojů ve tvaru písmene L, která má rozměry $105 \times 33 \text{ mm}$ (shodné s rozměry desky napájecího zdroje).

Výkresová dokumentace této části se nachází v přílohách: A16 - schéma zapojení, A17 a A18 - předlohy pro výrobu DPS, A19 a A20 - osazovací výkres DPS a B4 - seznam použitých součástek. Výsledky měření této části se nachází v příloze E.



Obr. 3.7: Prototyp pomocného napájecího zdroje.

3.5 Konstrukční řešení procesorové desky

Procesorová deska je z pohledu konstrukce nejjednodušší deskou celého zařízení. DPS je realizovaná jako oboustranná deska o rozměrech 73 x 50 mm. Pro maximální úsporu místa je tato část zasunuta nastojato v řídicím konektoru sběrnice TWI na korekční desce.

Velkou výhodou pro snazší vývoj a ladění obslužného softwaru pro mikrokontrolér je konektor obsahující sběrnice ISP a UART, pomocí kterého je možné připojit PC k mikrokontroléru bez jakéhokoliv rozpojování kabeláže.

Výkresová dokumentace této části se nachází v přílohách: A21 - schéma zapojení, A22 a A23 - předlohy pro výrobu DPS, A24 a A25 - osazovací výkres DPS a B5 - seznam použitých součástek.

3.6 Konstrukční řešení úložného boxu

Úložný box zařízení se skládá ze čtyř částí: základní desky, krytu, zadního a předního panelu. Základní deska a kryt je realizován z dubové překližky o tloušťce 10 mm. Na základní desce je umístěná veškerá elektronika, kromě aktivního chlazení. Toto chlazení tvoří tři 40 mm ventilátory, které jsou namontovány ve spodu krytu. Aby se do zařízení nedostával prach, tak na každém z ventilátorů je mřížka s prachovým filtrem, která je zapuštěná z horní strany krytu (viz příloha A26). Vnější plochy boxu jsou lakovány černou barvou s vysokým leskem. Demontáž krytu a přístup k elektronice umožňují vruty, které jsou ve spod základní desky.

Přední panel je vyroben z perforovaného nerezového plechu o tloušťce 0,8 mm. Z vnitřní strany panelu je připevněn grafický displej, signální led dioda, ovládací kódér a sluchátkový výstup. Zadní panel je vyroben z hliníkového plechu o tloušťce 1 mm, na kterém jsou připevněné veškeré konektory zesilovače a hlavní vypínač. V pravé části zadního panelu (při pohledu zezadu) je výdech aktivního chlazení, díky kterému je vzduch, který proudí zesilovačem nucen procházet přes chladič usměrňovače výkonového zdroje a chladit ho (viz kapitola 3.3).

Z vnitřní strany úložného boxu je nalepena hliníková folie, která stíní jak samotné zařízení, tak okolí např. od rušení ze spínaného zdroje.

4 ZÁVĚR

V této práci byl vytvořen návrh kompletního obvodového řešení integrovaného zesilovače pro domácí kino s koncovým stupněm osazeným trojicí integrovaných obvodů TAS5630B o maximálním výkonu 6 x 300 W, který obsahuje výstupní filtry a další obvody pro hardwarové řízení a sledování stavu zesilovače. Další částí zařízení je korekční část, která obsahuje obvody pro zpracování digitálních a analogových vstupů, pěti pásmový ekvalizér a filtr pro LFE kanál. O napájení zesilovače se stará dvojice spínaných zdrojů o celkovém výkonu 2,4 kW. Řízení přístroje zajišťuje procesorová část, kterou tvoří mikrokontrolér ATmega128. Komunikace uvnitř zesilovače probíhá po sběrnících TWI a SPI s úrovní 3,3 V.

Na základě schémat bylo navrženo pět desek plošných spojů, které byly následně vyrobeny a osazeny součástkami. Dále bylo navrženo aktivní chlazení v kombinaci s masivními hliníkovými chladiči. Celé zařízení je uloženo ve stíněném designové dřevěném boxu.

Dále byl navržen software pro mikrokontrolér. Ovládání zajišťuje rotační kodér, který slouží k listování v menu, přes které je řízen celý zesilovač. Grafický výstup je zajištěn grafickým displejem.

V závěru práce byly všechny části zesilovače změřeny a vyzkoušeny. Koncový stupeň v porovnání s katalogovými hodnotami vykazuje horší šumové vlastnosti a větší přeslechy mezi kanály. Naopak zesilovač dosahuje velmi vysoké účinnosti (při výkonu 120W má účinnost 95%). Výkonový zdroj pracuje přesně podle očekávání, bohužel nebylo možné změřit zatěžovací charakteristiku a účinnost na síťovém napětí, protože nebyla k dispozici dostatečná zátěž. Experimentálně během měření bylo zjištěno, že výkonový zdroj velmi vyzařuje rušení. Tento problém byl vyřešen umístěním celého zařízení do stíněného boxu. Při oživování pomocného zdroje se neustále vyskytovaly problémy s řídicím obvodem TNY265, proto byl tento zdroj vyměněn za průmyslový zdroj MeanWell a doplněn invertorem záporného napětí. Korekční obvody fungují podle předpokladů, v prvotní fázi oživování se vyskytly problémy s inicializační sekvencí DSP procesoru, nicméně nyní funguje vše jak má včetně digitálních vstupů. Díky možnosti nastavení velmi vysokého zesílení předzesilovače je možné k domácímu kinu připojit například i elektrickou kytaru.

LITERATURA

- [1] S/PDIF [online] – [cit. 13. prosince 2015]. Dostupné na [www: https://en.wikipedia.org/wiki/S/PDIF](https://en.wikipedia.org/wiki/S/PDIF)
- [2] STMicroelectronics STA310 datasheet [online]. STMicroelectronics 2003 [cit. 13. prosince 2015]. Dostupné na [www: <http://datasheet.octopart.com/STA310-STMicroelectronics-datasheet-33008842.pdf>](http://datasheet.octopart.com/STA310-STMicroelectronics-datasheet-33008842.pdf).
- [3] TAS5630B [online] Texas Instrumets 2015: Analog input 300W Stereo class D amplifier with integrated feedback [cit. 13. prosince 2015]. Dostupné na [www: <http://www.ti.com/product/tas5630b>](http://www.ti.com/product/tas5630b).
- [4] TAS5630PHD2EVM User's Guide (Rev. A) Texas Instrumets 2010 [cit. 13. prosince 2015]. Dostupné na [www: < http://www.ti.com/lit/ug/slau287a/slau287a.pdf>](http://www.ti.com/lit/ug/slau287a/slau287a.pdf).
- [5] PCM1680 [online] Texas Instrumets 2008: 105dB SNR 8-Channel Audio DAC, 24-Bit, 192-kHz Sampling, Enhanced Multilevel, Delta-Sigma, Audio D/A Converter (Rev. B) [cit. 13. prosince 2015]. Dostupné na [www: <http://www.ti.com/product/pcm1680>](http://www.ti.com/product/pcm1680).
- [6] Interfacing AES3 & S/PDIF [online]. Rane Corporation 2001 [cit. 13. prosince 2015]. Dostupné na [www: <http://www.nu9n.com/images/AES3-SPDIF-notes.pdf >](http://www.nu9n.com/images/AES3-SPDIF-notes.pdf).
- [7] 5-ti pásmový nf ekvalizér [online]. Jaroslav Belza – [cit. 13. prosince 2015]. Dostupné na [www: <http://www.belza.cz/audio/eq5b.htm>](http://www.belza.cz/audio/eq5b.htm).
- [8] Regulovatelný zdroj 3-60V 40A [online] danyk.cz, 2010 [cit. 13. prosince 2015]. Dostupné na [www: <http://danyk.cz/reg60v.png>](http://danyk.cz/reg60v.png).
- [9] OPA4134 [online] Texas Instrumets 2015: SoundPlus(TM) High Performance Audio Operational Amplifiers [cit. 13. prosince 2015]. Dostupné na [www: <http://www.ti.com/product/opa4134>](http://www.ti.com/product/opa4134).
- [10] ATmega128 [online] Atmel Corporation: The high-performance, low-power Atmel 8-bit AVR RISC-based microcontroller [cit. 13. prosince 2015]. Dostupné na [www: <http://www.atmel.com/devices/ATMEGA128.aspx>](http://www.atmel.com/devices/ATMEGA128.aspx).
- [11] Nízkofrekvenční a vysokofrekvenční měření [online]. SOU energetické a elektrotechnické učiliště Plzeň [cit. 22. května 2016]. Dostupné na [www: < http://elnika.sweb.cz/mereni/mereni.html>](http://elnika.sweb.cz/mereni/mereni.html).

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

TOSLINK	Optický digitální vstup S/PDIF, popsáno v kapitole 1.1.1
S/PDIF	Sony/Philips Digital InterFace, popsáno v kapitole 1.1.1
DSP	Digital signal processor, digitální signálový procesor
AES/EBU	Profesionální označení pro S/PDIF
XLR konektor	Konektor pro profesionální použití v audio technice, nejčastěji má tři kontakty
RCA konektor	Konektor pro audio/video ve spotřební elektronice, známý jako CINCH
BMC	Biphase mark code, linkový kód
SCMS	Serial Copy Management System, systém pro ochranu autorských práv audio děl
ASCII	American Standard Code for Information Interchange, kódová tabulka americké abecedy
EIAJ	Typ konektoru, EIAJ optický je ekvivalent TOSLINK
PCM	Pulse-code modulation, pulzně kódová modulace
HDMI	High-Definition Multi-media Interface, nekomprimovaný obrazový a zvukový signál v digitálním formátu
LFE	Low-frequency effects, audio kanál kmitočtů do 150Hz
AC-3	Původní označení pro Dolby Digital
DTS	Digital theatre system, domácí kino
MMDSP+	multi-format digital signal processor ,multi-formátový digitální signální procesor
MPEG	Moving Picture Experts Group, kódování pohyblivého obrazu a přidruženého zvuku
TWI	Two Wire Interface, dvoudrátové rozhraní
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové periferní rozhraní
THD+N	Total harmonic distortion + noise, celkové harmonické zkreslení + šum
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
GDT	Gate Drive Transformer, transformátor pro řízení gejtů tranzistorů
LCD	Liquid crystal display, displej z tekutých krystalů

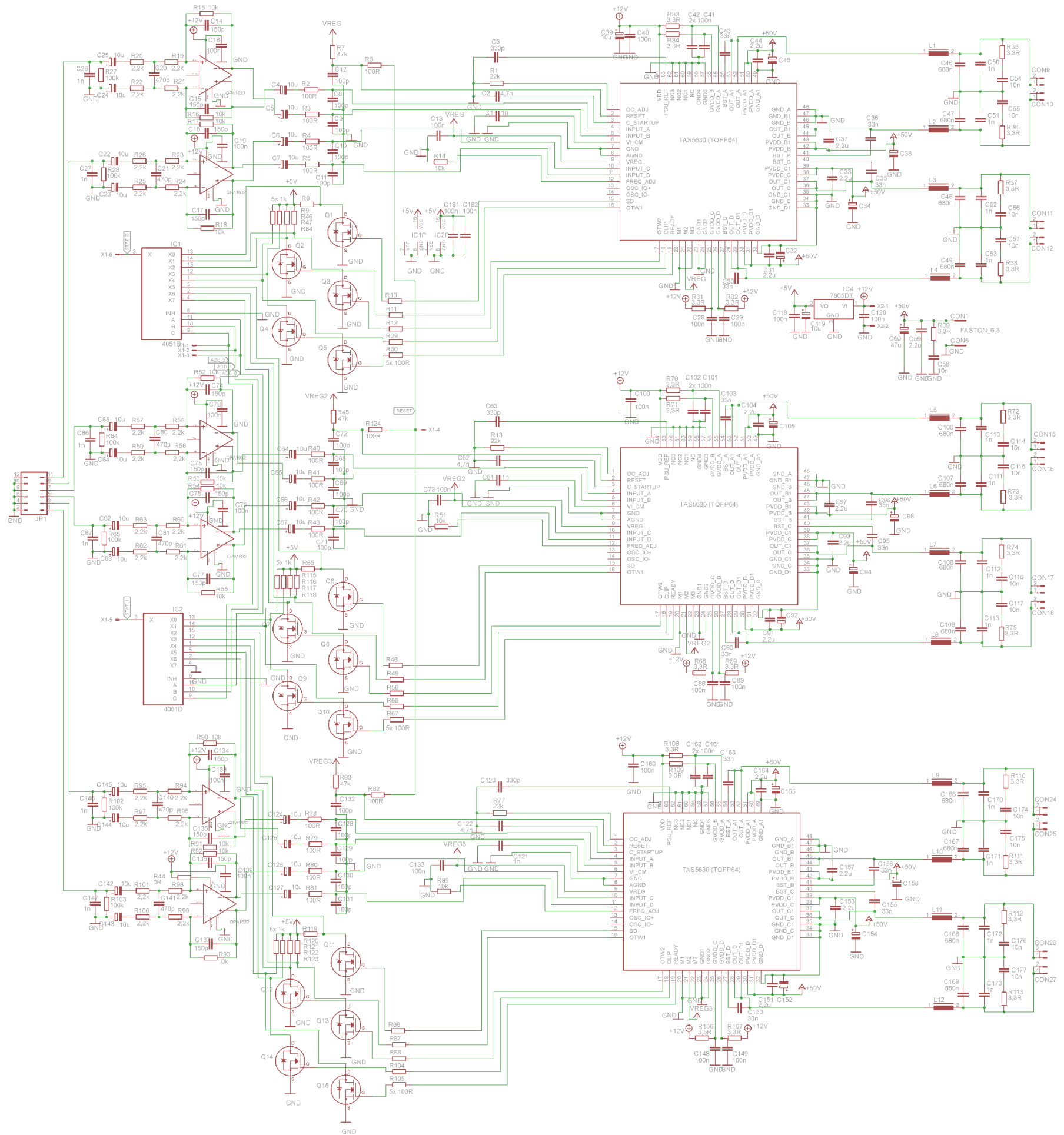
SEZNAM PŘÍLOH

A	NÁVRH ZAŘÍZENÍ	44
A.1	Schéma koncového stupně.....	44
A.2	Deska plošného spoje koncového stupně – top	45
A.3	Deska plošného spoje koncového stupně – bottom	45
A.4	Osazovací výkres desky plošného spoje koncového stupně – top.....	46
A.5	Osazovací výkres desky plošného spoje koncového stupně – bottom....	46
A.6	Schéma zapojení korekční části	47
A.7	Deska plošného spoje korekční části – top	48
A.8	Deska plošného spoje korekční části – bottom.....	48
A.9	Osazovací výkres desky plošného spoje korekční části – top	48
A.10	Osazovací výkres desky plošného spoje korekční části – bottom	49
A.11	Schéma napájecího zdroje	50
A.12	Deska plošného spoje výkonového zdroje – top.....	51
A.13	Deska plošného spoje korekční části – bottom.....	52
A.14	Osazovací výkres desky plošného spoje výkonového zdroje – top	53
A.15	Osazovací výkres desky plošného spoje výkonového zdroje – bottom..	54
A.16	Schéma pomocného zdroje	55
A.17	Deska plošného spoje pomocného zdroje – top.....	56
A.18	Deska plošného spoje pomocného zdroje – bottom.....	56
A.19	Osazovací výkres desky plošného spoje pomocného zdroje – top	56
A.20	Osazovací výkres desky plošného spoje pomocného zdroje – bottom...	56
A.24	Osazovací výkres desky plošného spoje procesorové desky – top	58
A.25	Osazovací výkres desky plošného spoje procesorové desky – bottom...	58
A.26	Výkres úložného boxu	59
B	SEZNAMY POUŽITÝCH SOUČÁSTEK	60
B.1	Seznam součástek koncového stupně	60
B.2	Seznam součástek korekční části	63
B.3	Seznam součástek výkonového napájecího zdroje	66
B.4	Seznam součástek pomocného napájecího zdroje	68
B.5	Seznam součástek procesorové desky	69

C	MĚŘENÍ ZESILOVAČE	70
C.1	Modulová frekvenční charakteristika koncového stupně	70
C.2	Odstupu signálu od šumu.....	71
C.3	Přeslechy mezi kanály	71
C.4	Vstupní impedance zesilovače.....	72
C.5	Výstupní impedance zesilovače.....	72
C.6	Účinnost koncového stupně (jeden kanál)	73
C.7	Výstupní spektrum koncového stupně.....	74
D	MĚŘNÍ KOREKČNÍ ČÁSTI	75
D.1	Modulová frekvenční charakteristika LFE kanálu.....	75
D.2	Modulová frekvenční charakteristika pěti pásmového ekvalizéru	76
E	MĚŘENÍ NAPÁJECÍHO ZDROJE	77
E.1	Zatěžovací charakteristika výkonového zdroje.....	77
E.2	Průběh napětí na impulzním transformátoru	79
E.3	Zvlnění výstupního napětí výkonového zdroje.....	80
E.4	Zatěžovací charakteristika pomocného zdroje.....	81

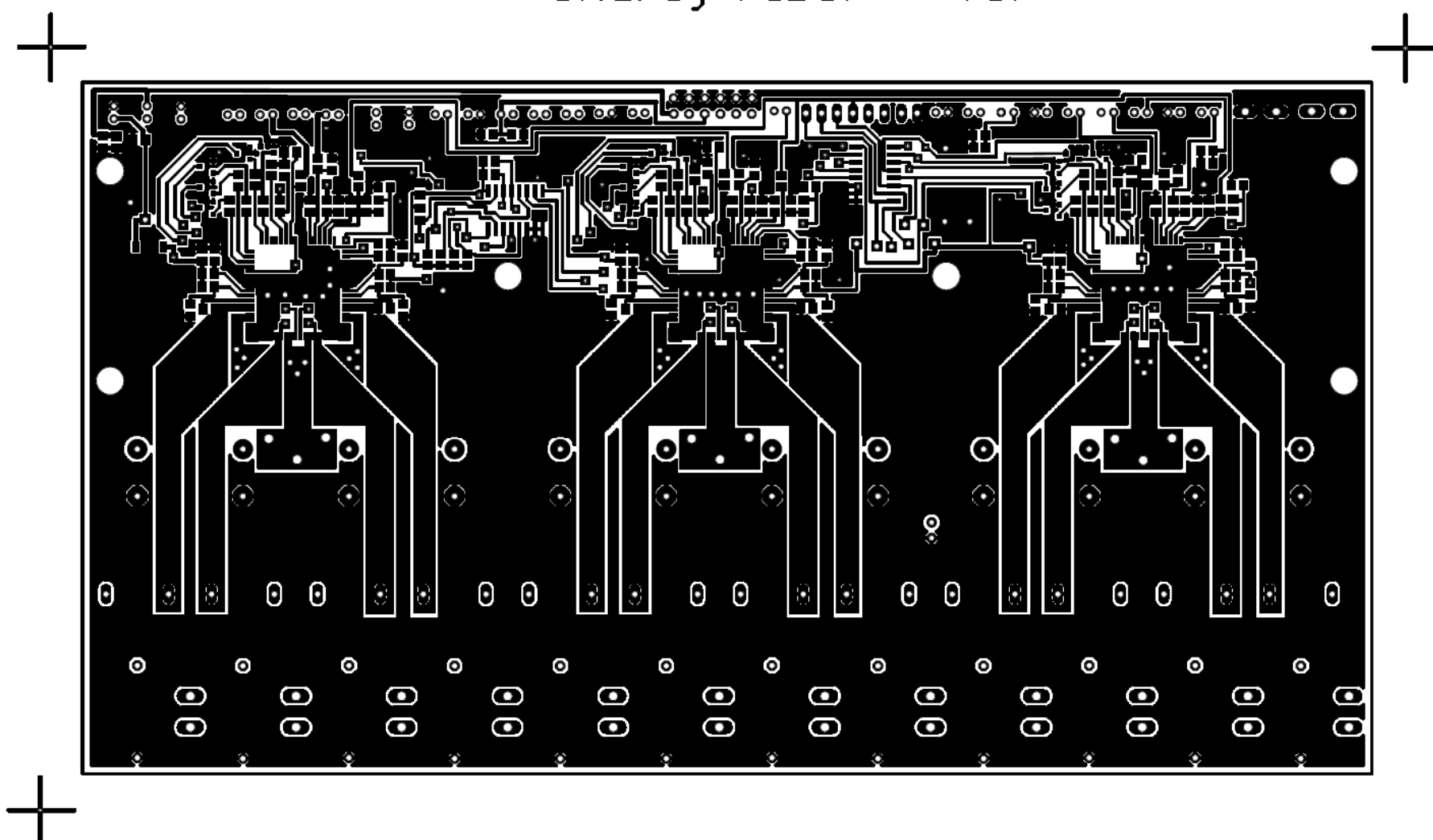
A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Schéma koncového stupně



A.2 Deska plošného spoje koncového stupně – top (strana součástek)

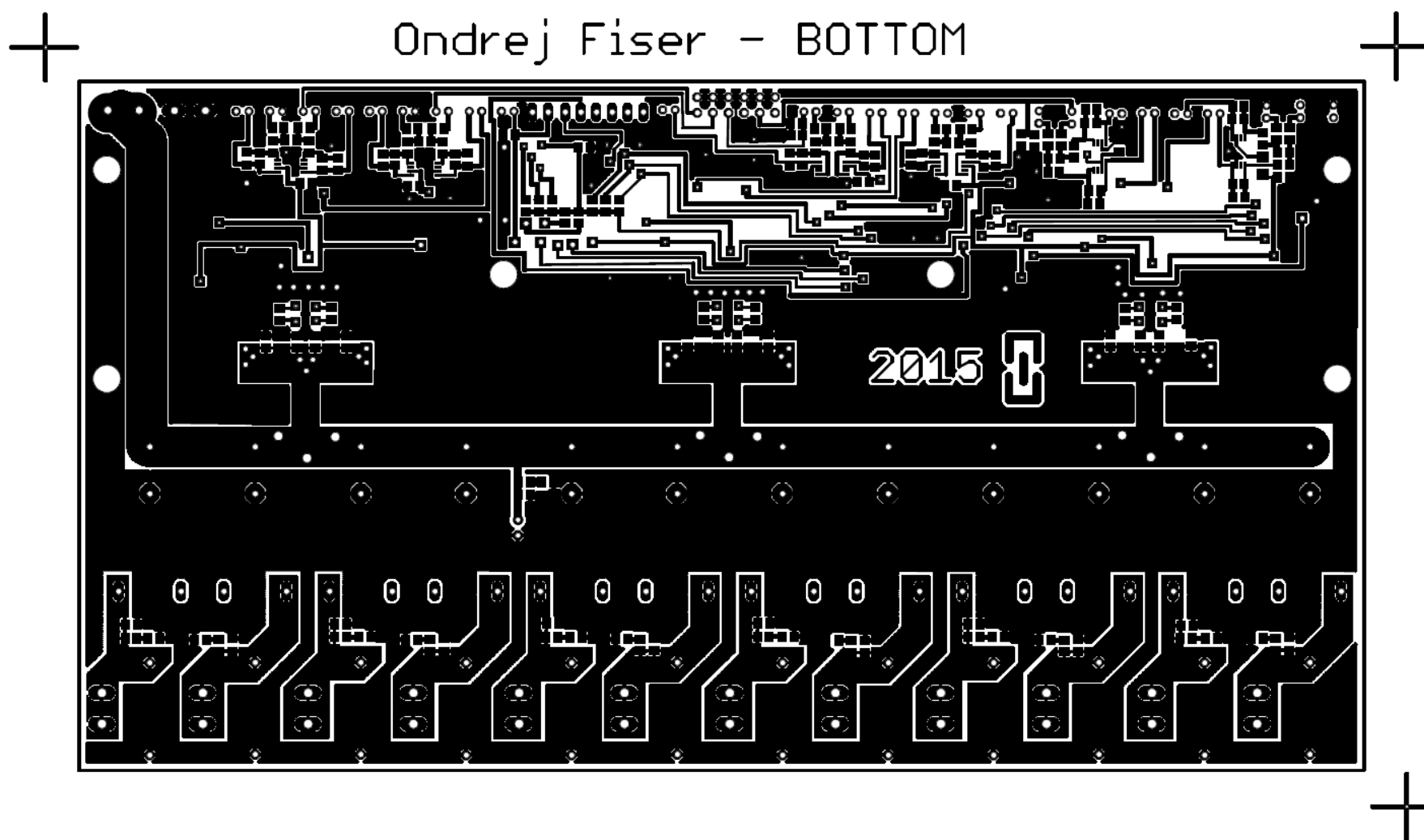
Ondrej Fiser – TOP



Měřítko: 1:1
Rozměry: 209 x 112 mm

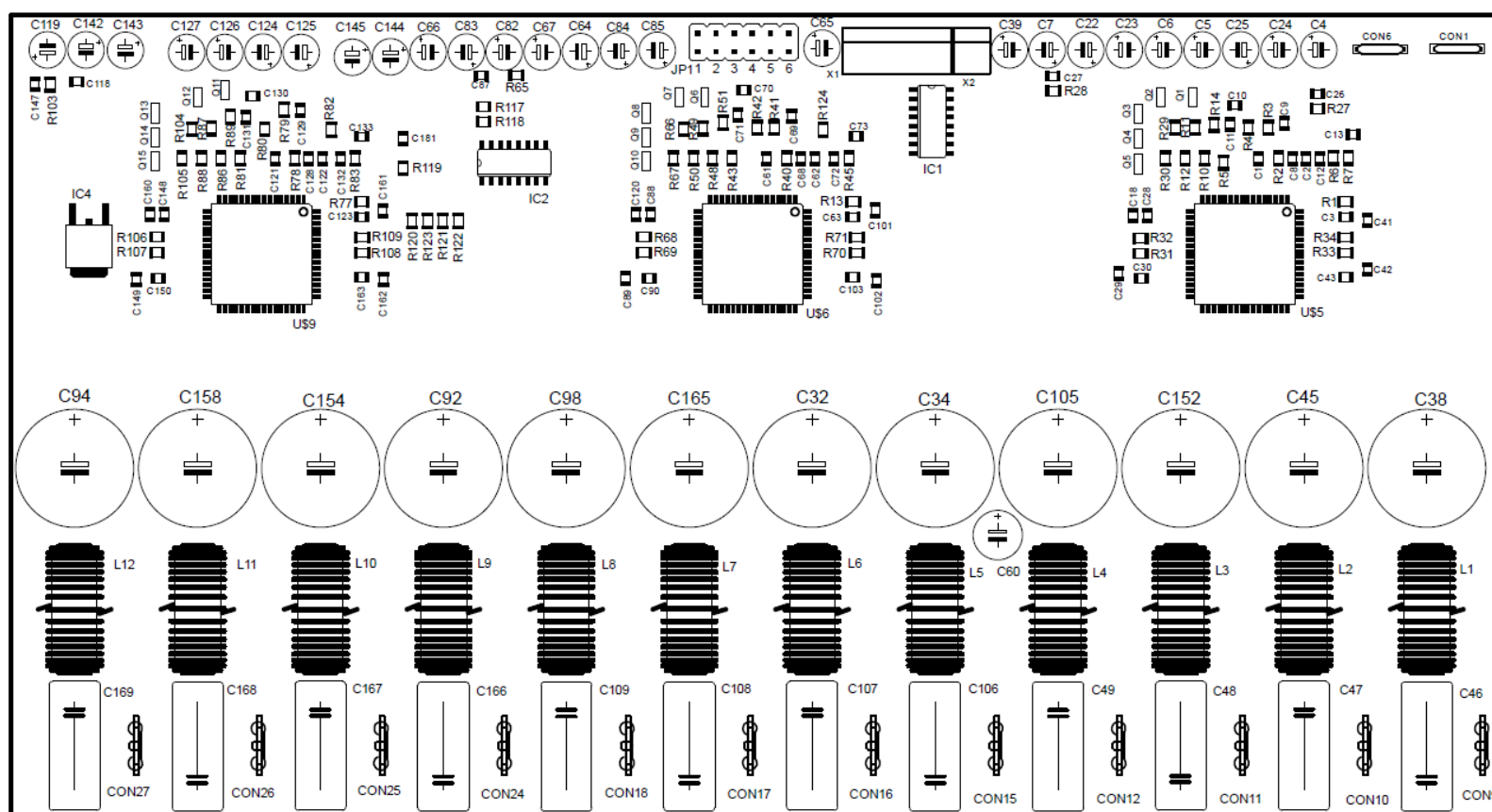
A.3 Deska plošného spoje koncového stupně – bottom (strana spojů)

Ondrej Fiser – BOTTOM



Měřítko: 1:1
Rozměry: 209 x 112 mm

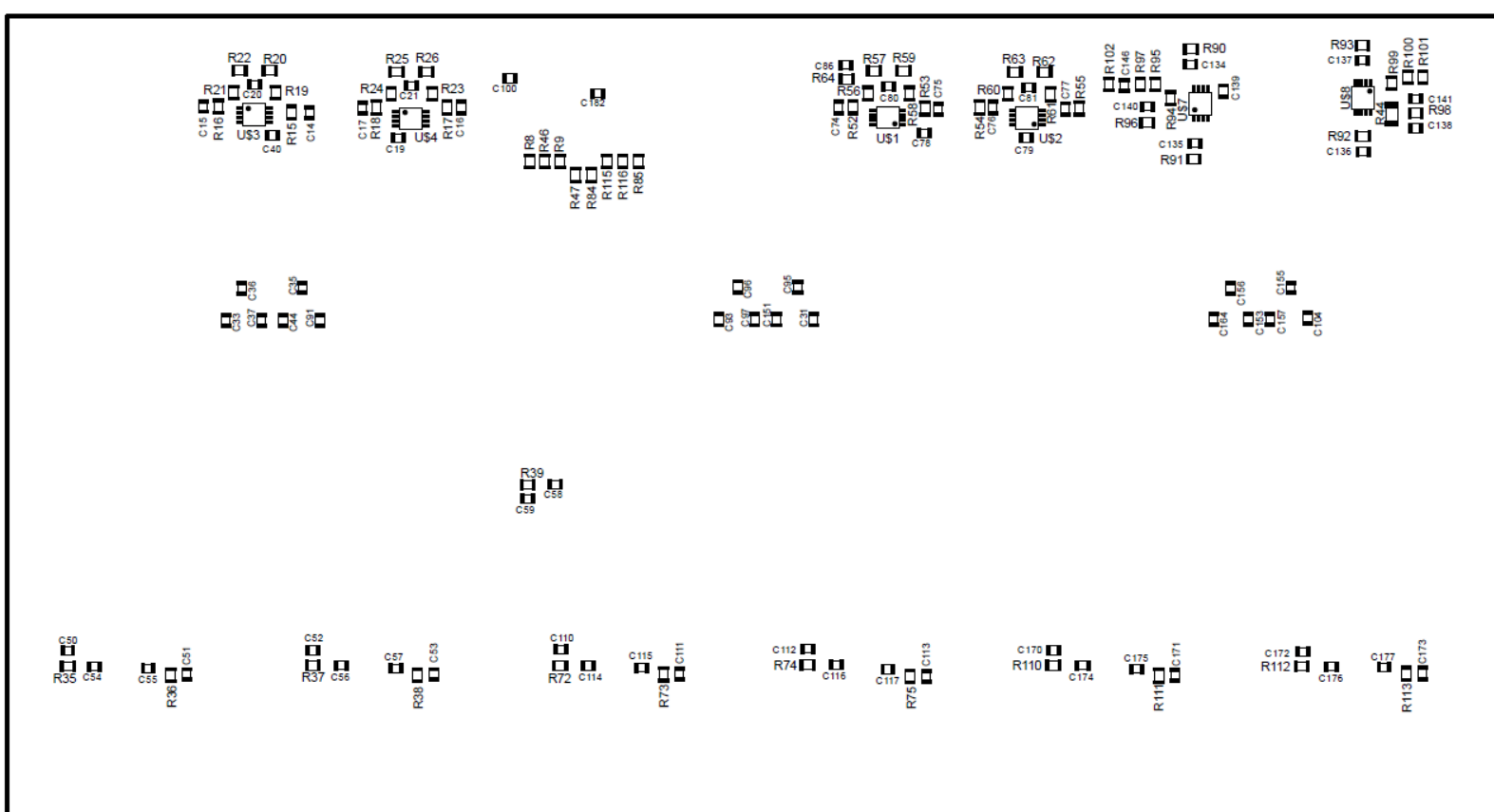
A.4 Osazovací výkres desky plošného spoje koncového stupně – top (strana součástek)



Měřítko: 1:1

Rozměry: 209 x 112 mm

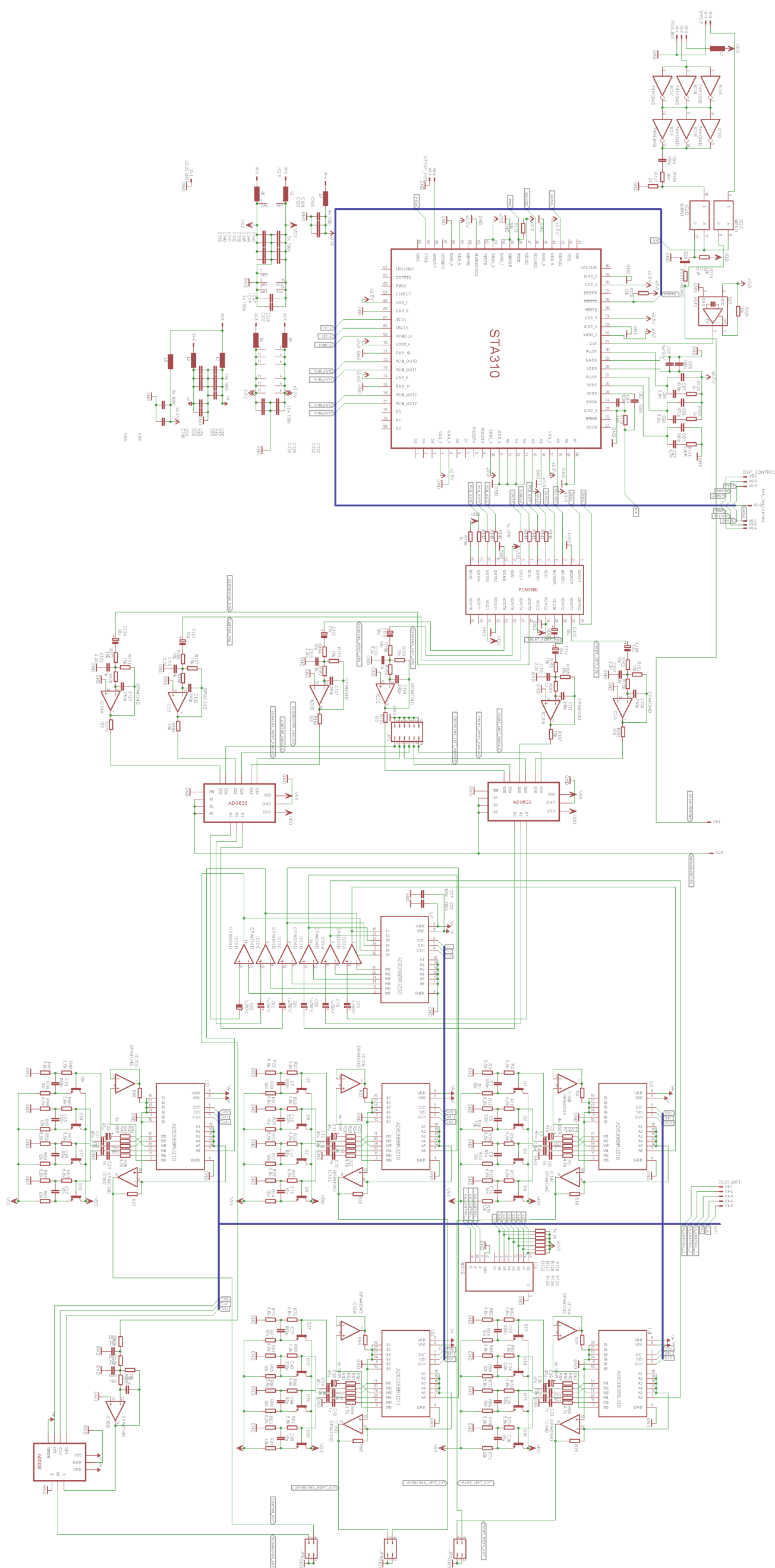
A.5 Osazovací výkres desky plošného spoje koncového stupně – bottom (strana spojů)



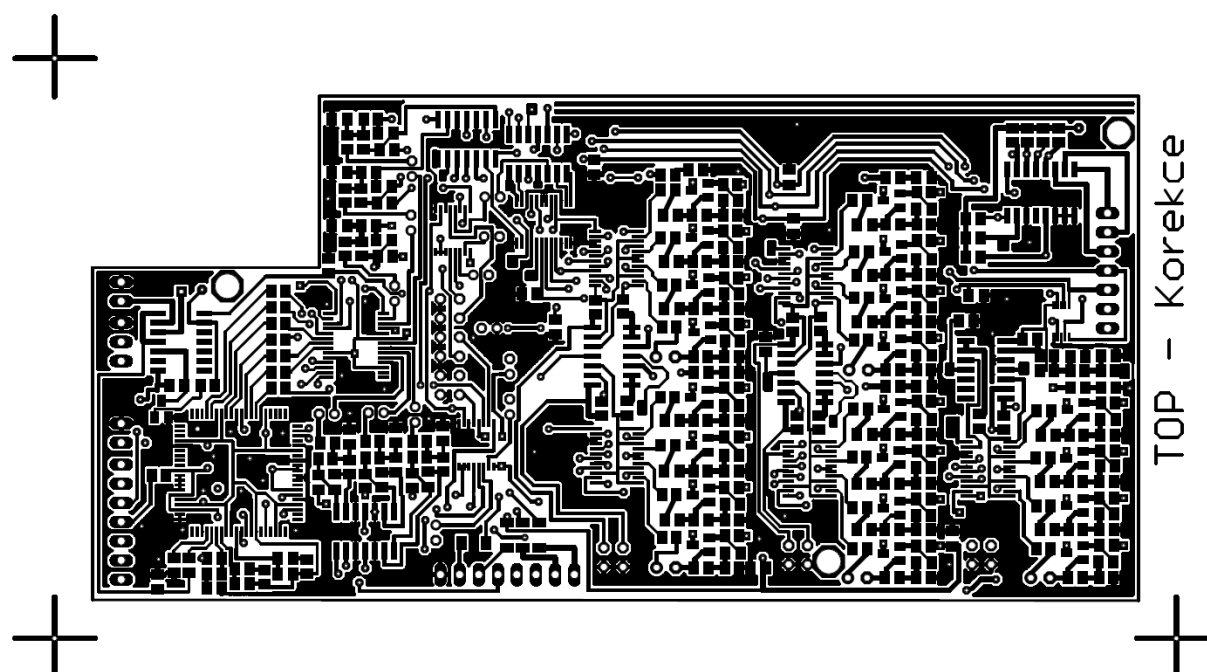
Měřítko: 1:1

Rozměry: 209 x 112 mm

A.6 Schéma zapojení korekční části

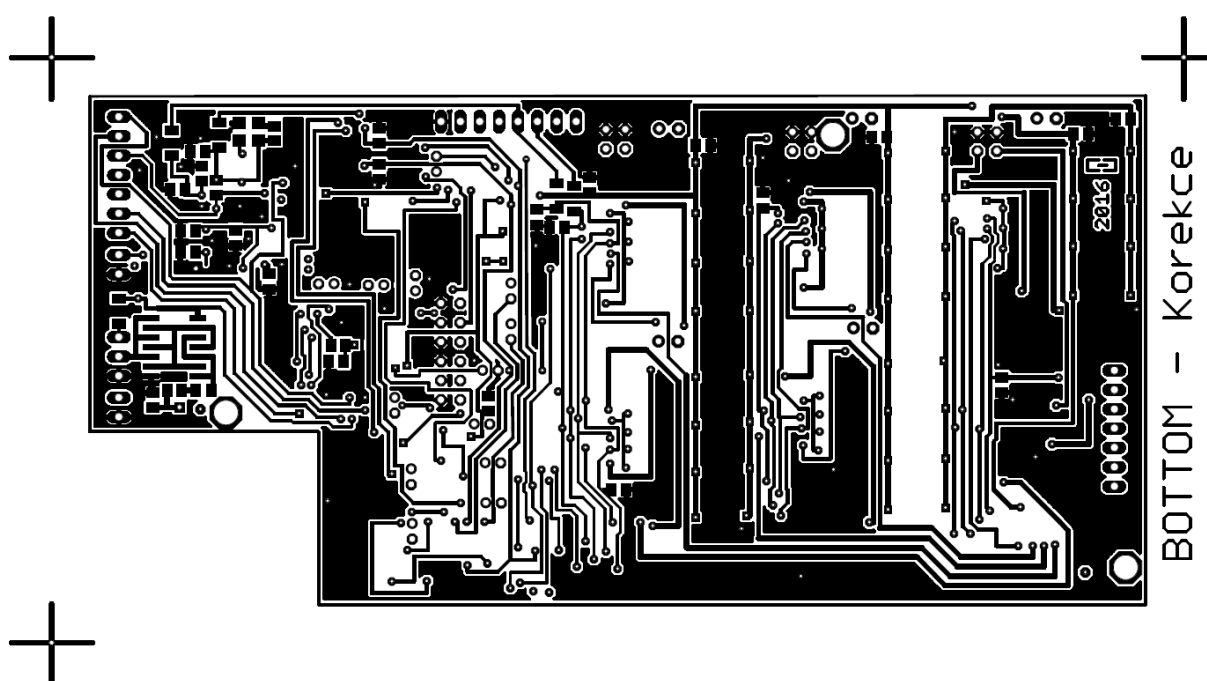


A.7 Deska plošného spoje korekční části – top (strana součástek)



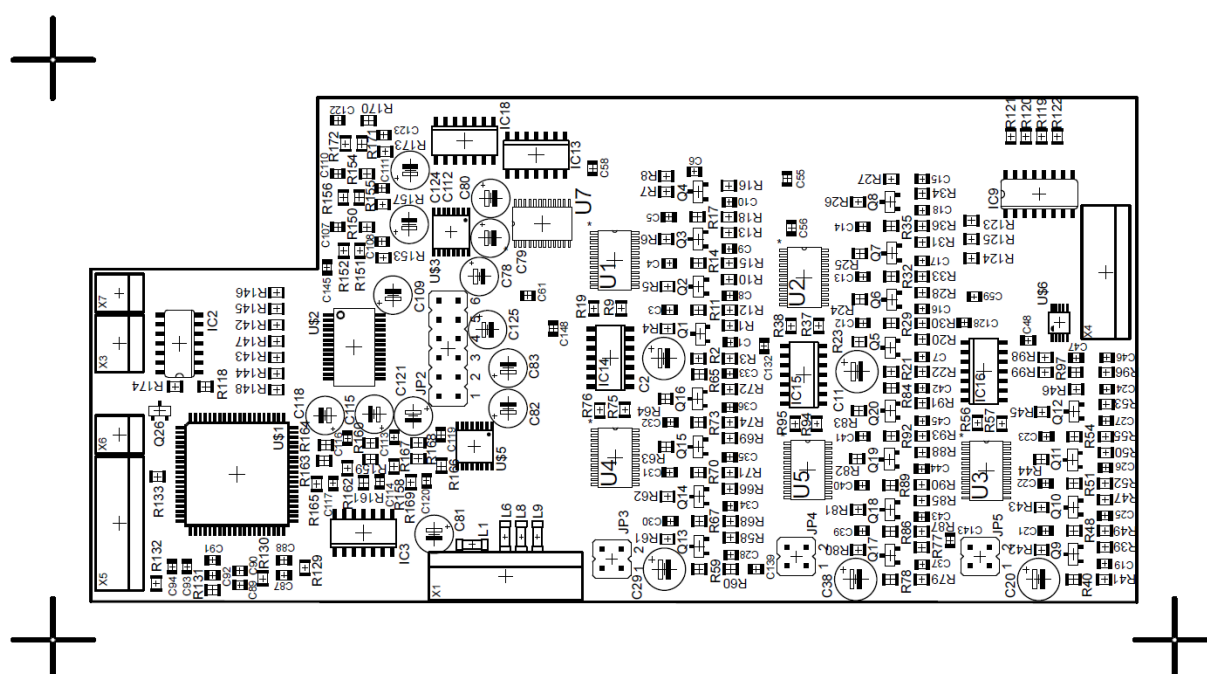
Měřítko: 1:1
Rozměry: 138 x 67 mm

A.8 Deska plošného spoje korekční části – bottom (strana spojů)



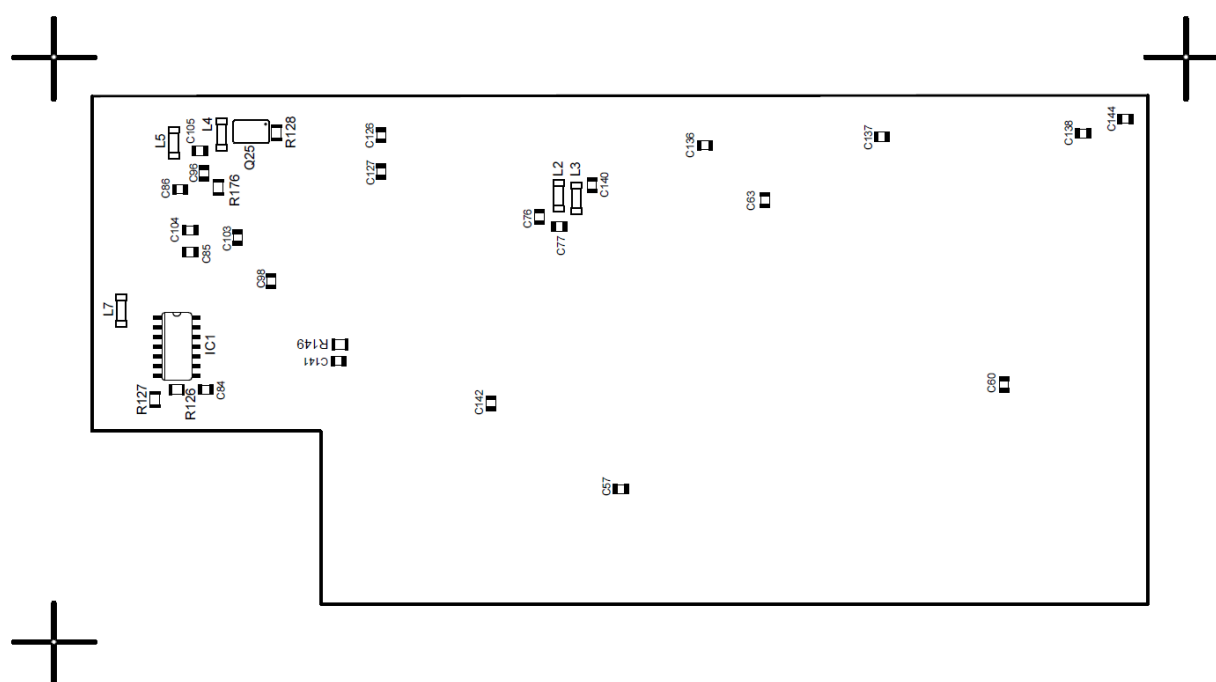
Měřítko: 1:1
Rozměry: 138 x 67 mm

A.9 Osazovací výkres desky plošného spoje korekční části – top (strana součástek)



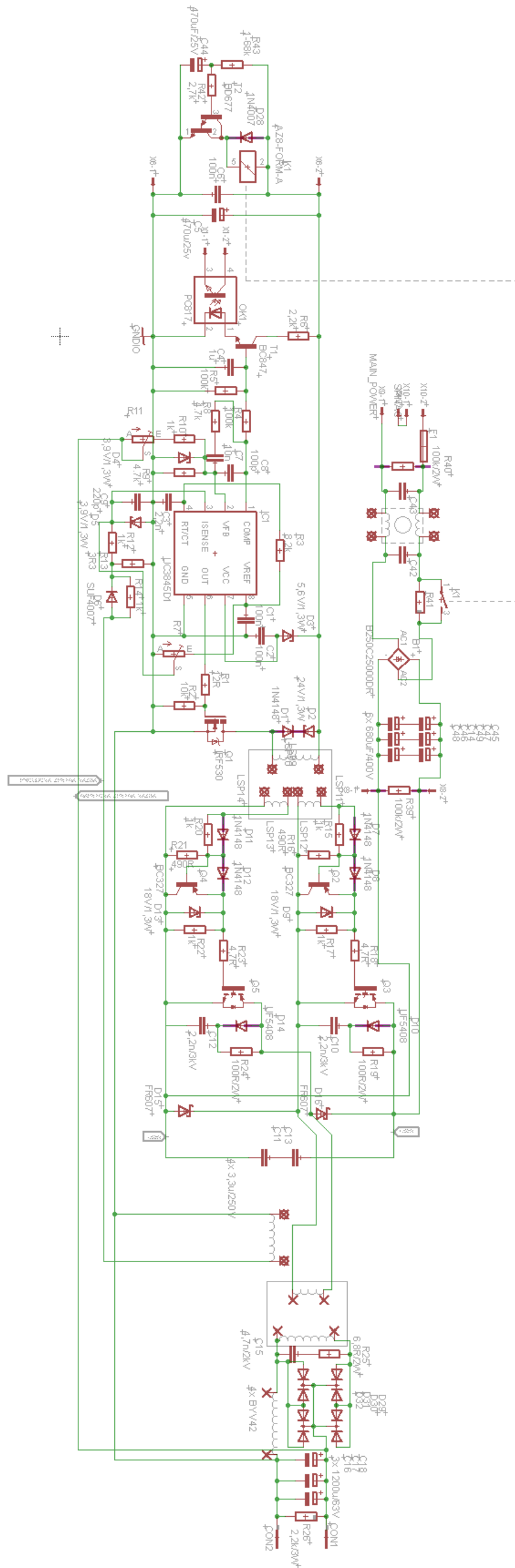
Měřítko: 1:1
Rozměry: 138 x 67 mm

A.10 Osazovací výkres desky plošného spoje korekční části – bottom (strana spojů)

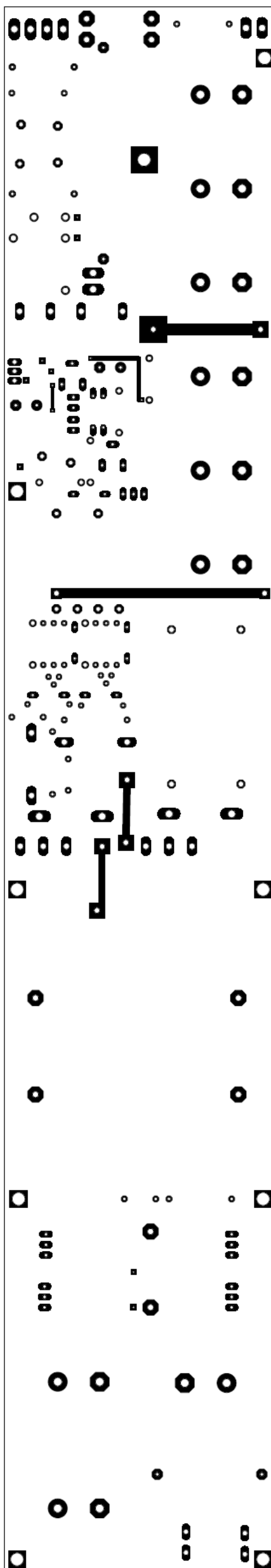


Měřítko: 1:1
Rozměry: 138 x 67 mm

A.11 Schéma napájecího zdroje

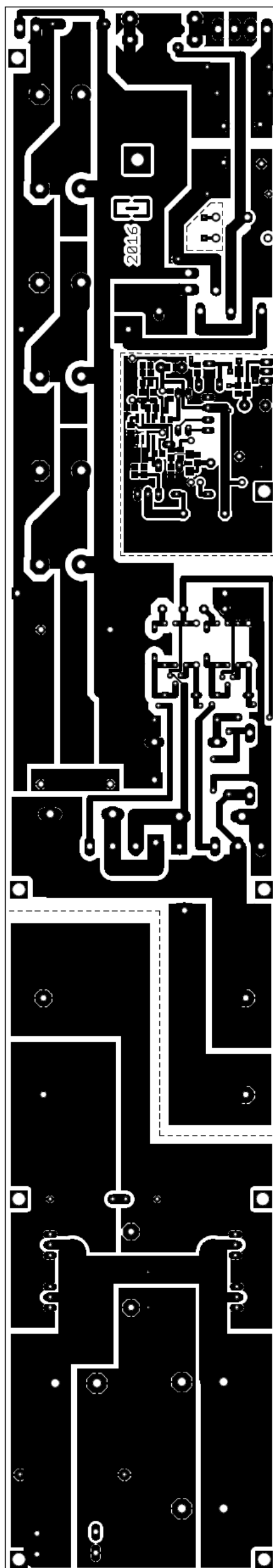


A.12 Deska plošného spoje výkonového zdroje – top (strana součástek – pouze drátové propojky)



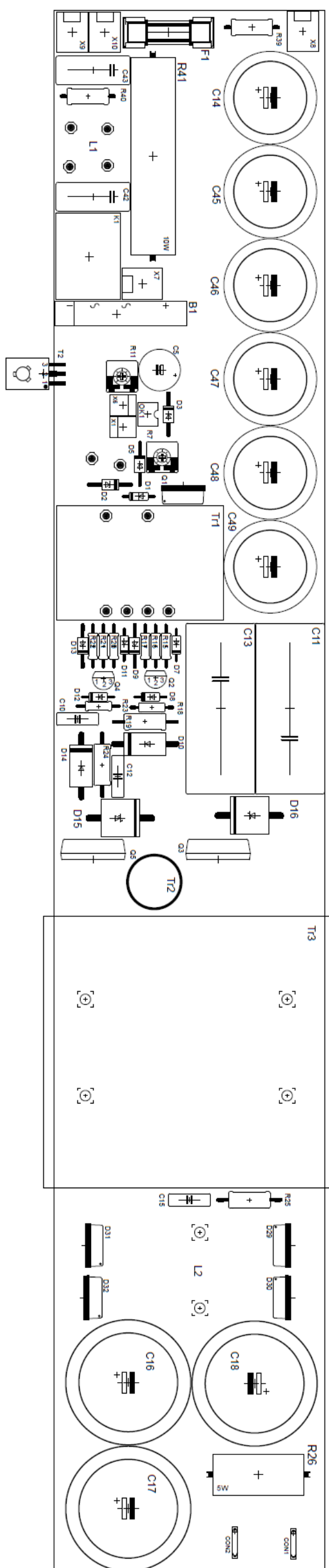
Měřítko: 1:139
Rozměry: 381 x 66 mm

A.13 Deska plošného spoje korekční části – bottom (strana spojů)



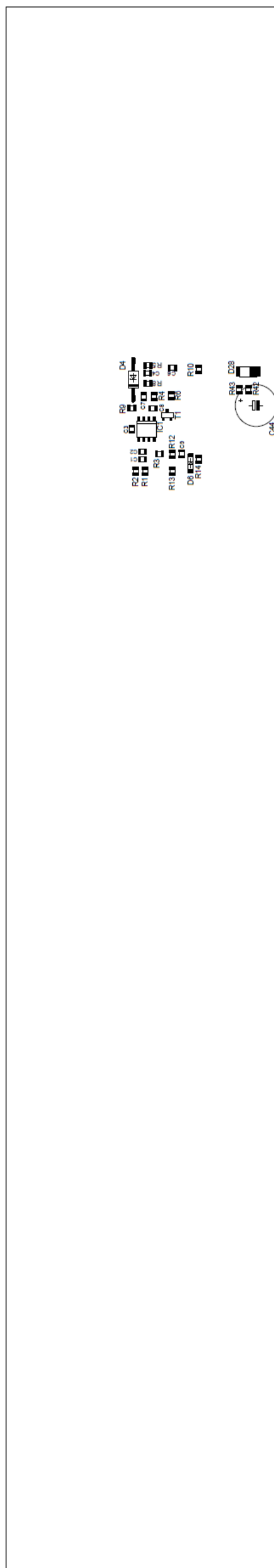
Měřítko: 1:139
Rozměry: 381 x 66 mm

A.14 Osazovací výkres desky plošného spoje výkonového zdroje – top (strana součástek)



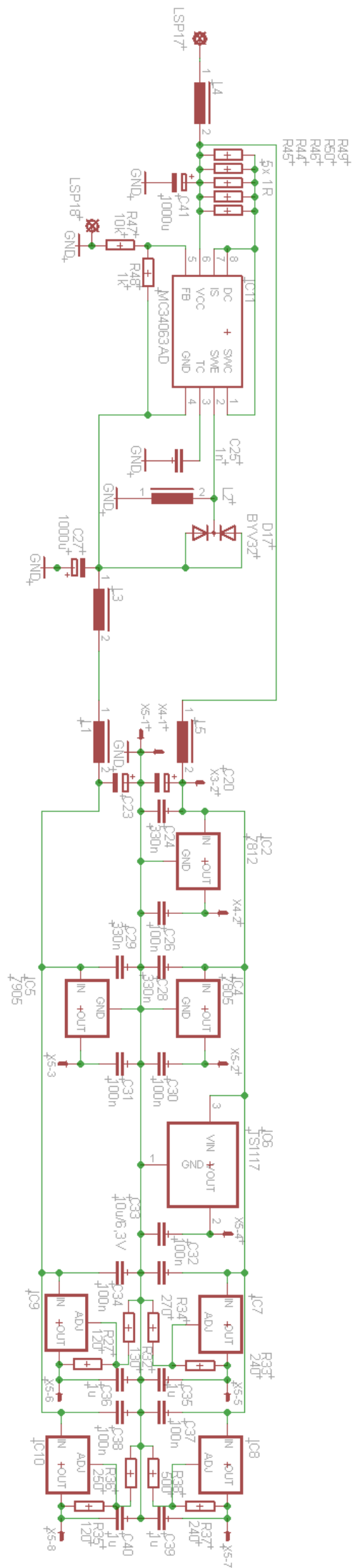
Měřítko: 1:139
Rozměry: 381 x 66 mm

A.15 Osazovací výkres desky plošného spoje výkonového zdroje – bottom (strana spojů)

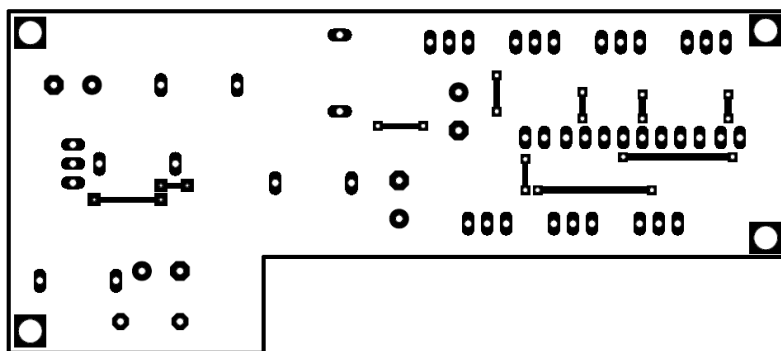


Měřítko: 1:139
Rozměry: 381 x 66 mm

A.16 Schéma pomocného zdroje

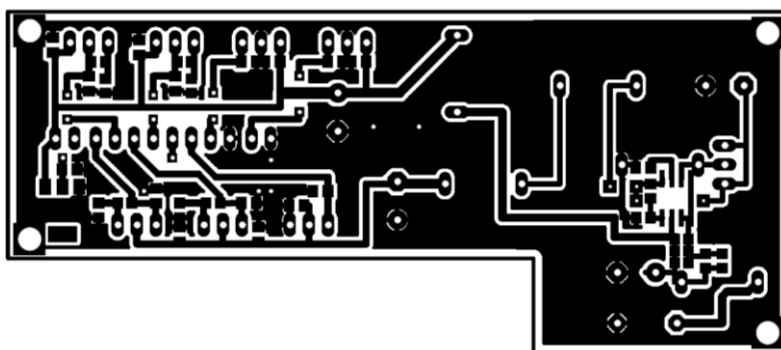


A.17 Deska plošného spoje pomocného zdroje – top (strana součástek – pouze drátové propojky)



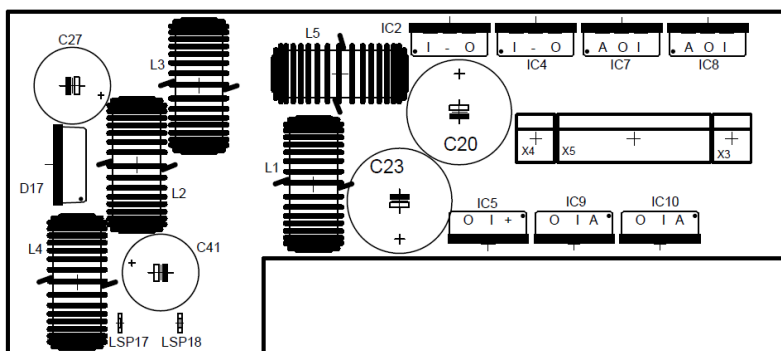
Měřítko: 1:1
Rozměry: 104 x 46 mm

A.18 Deska plošného spoje pomocného zdroje – bottom (strana spojů)



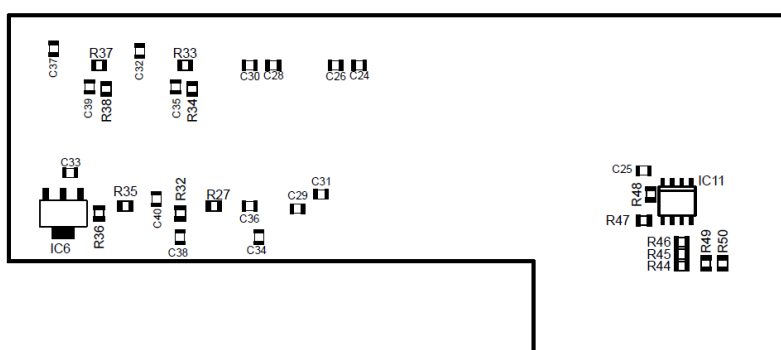
Měřítko: 1:1
Rozměry: 104 x 46 mm

A.19 Osazovací výkres desky plošného spoje pomocného zdroje – top (strana součástek)



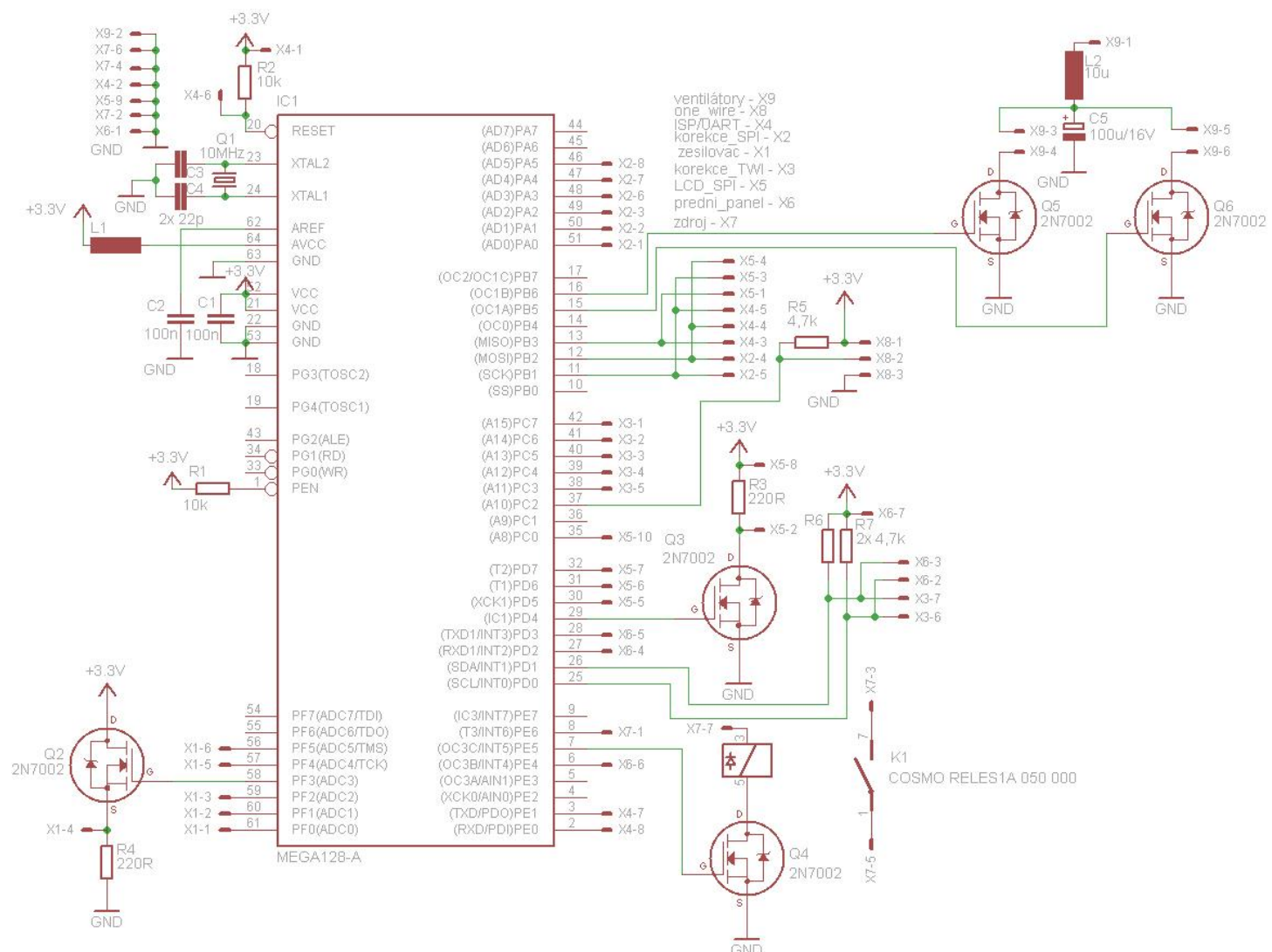
Měřítko: 1:1
Rozměry: 104 x 46 mm

A.20 Osazovací výkres desky plošného spoje pomocného zdroje – bottom (strana spojů)

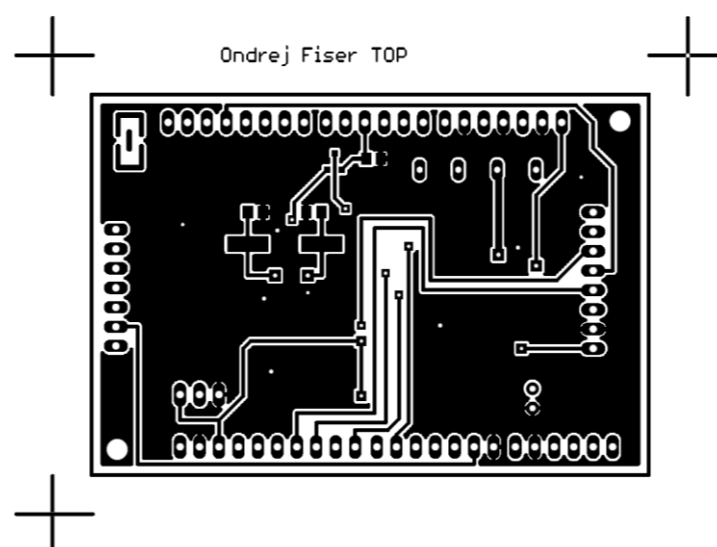


Měřítko: 1:1
Rozměry: 104 x 46 mm

A.21 Schéma procesorové desky

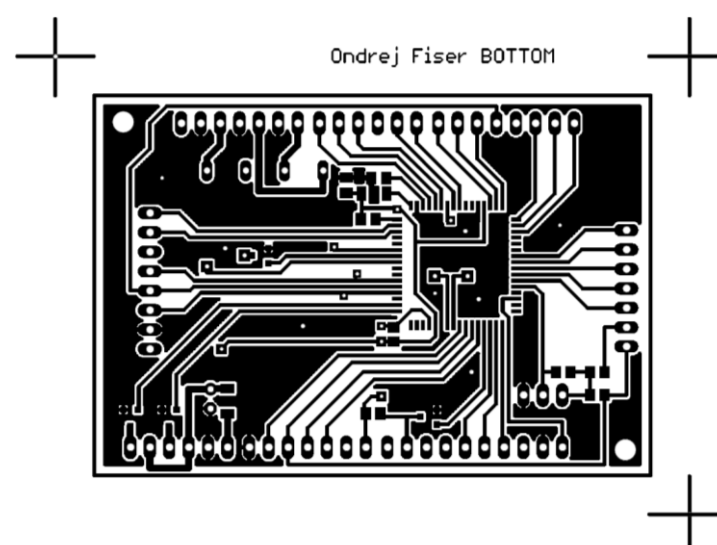


A.22 Deska plošného spoje procesorové desky – top (strana spojů)



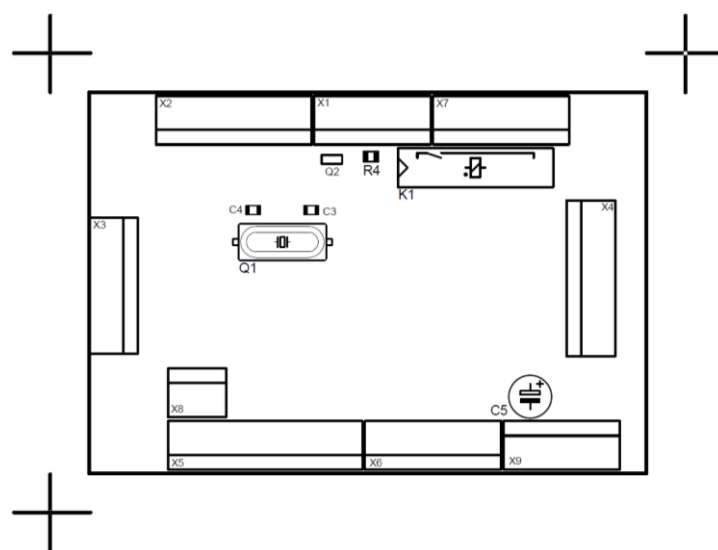
Měřítko: 1:1
Rozměry: 73 x 50 mm

A.23 Deska plošného spoje procesorové desky – bottom (strana spojů)



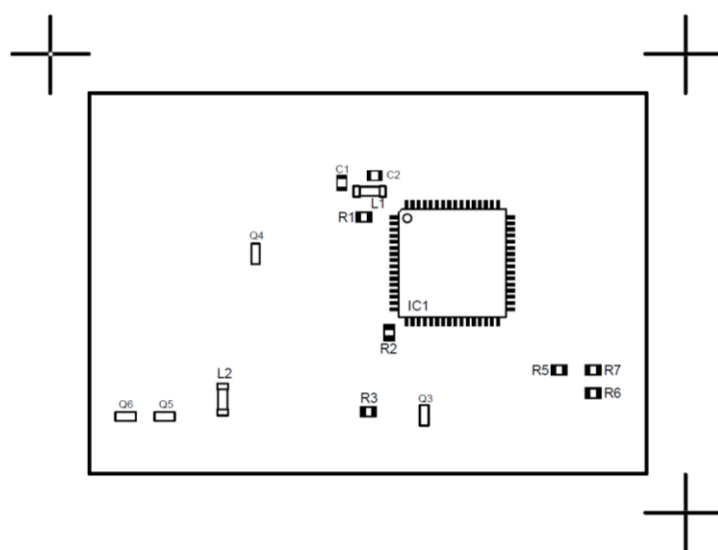
Měřítko: 1:1
Rozměry: 73 x 50 mm

A.24 Osazovací výkres desky plošného spoje procesorové desky – top (strana součástek)



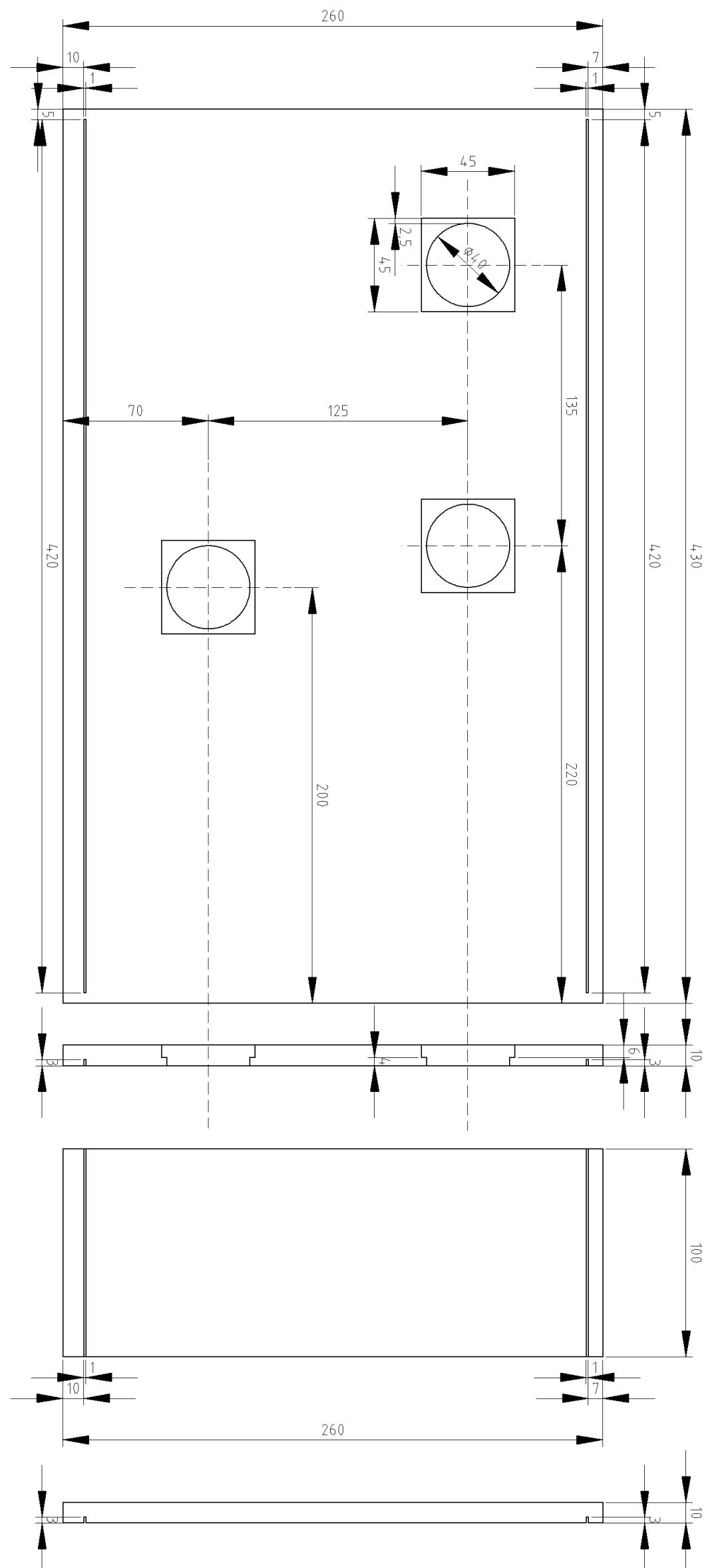
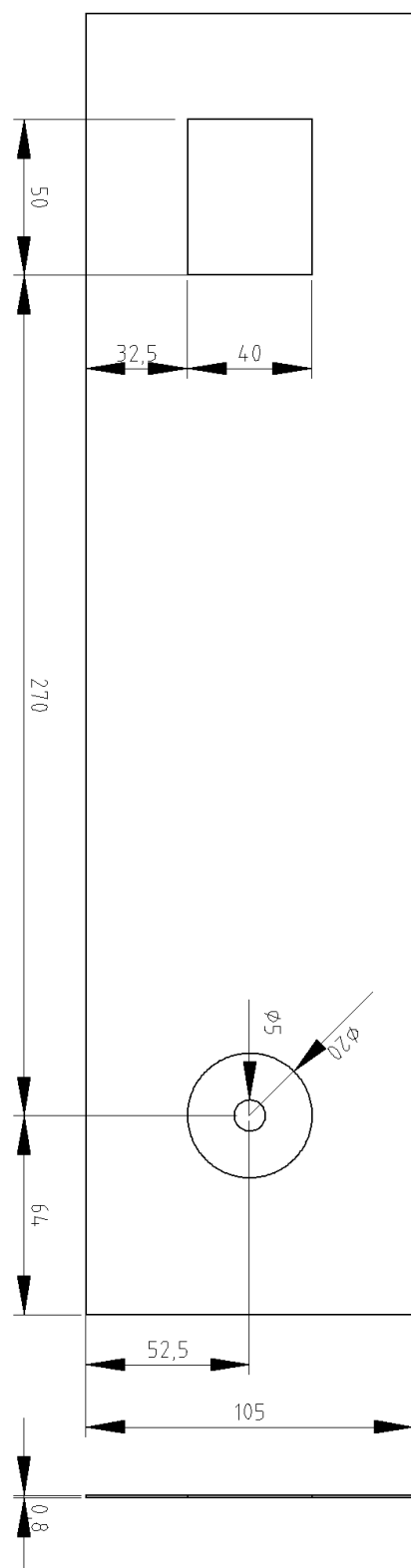
Měřítko: 1:1
Rozměry: 73 x 50 mm

A.25 Osazovací výkres desky plošného spoje procesorové desky – bottom (strana spojů)



Měřítko: 1:1
Rozměry: 73 x 50 mm

A.26 Výkres úložného boxu



B SEZNAMY POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

B.1 Seznam součástek koncového stupně

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
C1, C26, C27, C50, C51, C52, C53, C61, C86, C87, C110, C111, C112, C113, C121, C146, C147, C170, C171, C172, C173	21	1 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C13, C18, C19, C28, C29, C40, C41, C42, C73, C78, C79, C88, C89, C100, C101, C102, C118, C120, C133, C138, C139, C148, C149, C160, C161, C162, C181, C182	28	100 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C14, C15, C16, C17, C74, C75, C76, C77, C134, C135, C136, C137	12	150 pF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C2, C62, C122	3	4,7 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C20, C21, C80, C81, C140, C141	6	470 pF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C3, C63, C123	3	330 pF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C30, C35, C36, C43, C90, C95, C96, C103, C150, C155, C156, C163	12	33 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C31, C33, C37, C44, C59, C91, C93, C97, C104, C151, C153, C157, C164	13	2,2 uF/50 V	keramický kondenzátor	C0805K
C32, C34, C38, C45, C92, C94, C98, C105, C152, C154, C158, C165	12	1000 uF/50 V	elektrolytický kondenzátor	E7,5-16

Seznam součástek koncového stupně - pokračování

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
C4, C5, C6, C7, C22, C23, C24, C25, C39, C64, C65, C66, C67, C82, C83, C84, C85, C119, C124, C125, C126, C127, C143, C144, C145	26	10 uF/16 V	elektrolytický kondenzátor	E2-5
C46, C47, C48, C49, C106, C107, C108, C109, C166, C167, C168, C169	12	680 nF/63 V	foliový kondenzátor	C150-072X183
C54, C55, C56, C57, C58, C114, C115, C116, C117, C174, C175, C176, C177	13	10 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C60	1	47 uF/50 V	elektrolytický kondenzátor	E2,5-7
C8, C9, C10, C11, C12, C68, C69, C70, C71, C72, C128, C129, C130, C131, C132	15	100 pF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
CON1, CON6	2	FASTON_6,3	FASTON	FAST_63-08
CON9, CON10, CON11, CON12, CON15, CON16, CON17, CON18, CON24, CON25, CON26, CON27	12	FASTON_4,8	FASTON	ST4,8
IC1, IC2	2	4051D	IO	SO16
IC4	1	7805DT	IO	TO252
JP1	1	2 x 6 pinů	konektor	JP6Q
L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12	12	27 uH/ 10A	tlumivka	SFT830D
Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q10, Q11, Q12, Q13, Q14, Q15	15	2N7002	tranzistor	SOT-23
R1, R13, R77	3	22 kΩ/0,125 W	rezistor	M0805

Seznam součástek koncového stupně - pokračování

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
R14, R15, R16, R17, R18, R51, R52, R53, R54, R55, R89, R90, R91, R92, R93	15	10 k Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R19, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26, R56, R57, R58, R59, R60, R61, R62, R63, R94, R95, R96, R97, R98, R99, R100, R101	24	2,2 k Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R2, R3, R4, R5, R6, R10, R11, R12, R29, R30, R40, R41, R42, R43, R48, R49, R50, R66, R67, R78, R79, R80, R81, R82, R86, R87, R88, R104, R105, R124	30	100 Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R27, R28, R64, R65, R102, R103	6	100 k Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R31, R32, R33, R34, R35, R36, R37, R38, R39, R68, R69, R70, R71, R72, R73, R74, R75, R106, R107, R108, R109, R110, R111, R112, R113	25	3,3 Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R44	1	0 Ω /0,125 W	rezistor	R1206
R7, R45, R83	3	47 k Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R8, R9, R46, R47, R84, R85, R115, R116, R117, R118, R119, R120, R121, R122, R123	15	1 k Ω /0,125 W	rezistor	M0805
U\$1, U\$2, U\$3, U\$4, U\$7, U\$8	6	OPA1632	IO	DGK_S-PDSO-G8
U\$5, U\$6, U\$9	3	TAS5630B	IO	TQFP64
X1	1	6 pinů	konektor	22-23-2061
X2	1	2 piny	22-23-2021	22-23-2021

B.2 Seznam součástek korekční části

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
C1, C7, C19, C28, C37	5	680 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C10, C18, C27, C36, C45, C46, C47, C48	8	15 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C107, C110, C113, C116, C119, C122	6	2,2 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C108, C111, C114, C117, C120, C123	6	240 pF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C109, C112, C115, C118, C121, C124, C125	7	10 uF/35 V	elektrolytický kondenzátor	E2-5
C2, C11, C20, C29, C38	5	47 uF/25 V	elektrolytický kondenzátor	E2,5-6
C3, C12, C21, C30, C39	5	47 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C4, C13, C22, C31, C40	5	10 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C5, C14, C23, C32, C41	5	3,9 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C55, C56, C57, C58, C59, C60, C61, C63, C76, C77, C86, C93, C94, C96, C98, C103, C104, C105, C126, C127, C128, C132, C136, C137, C138, C139, C140, C141, C142, C143, C144, C145, C148	33	100 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C6, C15, C24, C33, C42	5	1 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C78, C79, C80, C81, C82, C83	6	1 uF/50 V	elektrolytický kondenzátor	E2-5
C8, C16, C25, C34, C43	5	330 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C84, C91	2	150 pF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C85	1	1 uF/10V	keramický kondenzátor	C0805K
C87, C89	2	470 pF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K

Seznam součástek korekční části - pokračování

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
C88, C90	2	5,6 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C9, C17, C26, C35, C44	5	68 nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
C92	1	4,7nF/ 63V	keramický kondenzátor	C0805K
IC1	1	74HC04D	IO	SO14
IC2	1	4066D	IO	SO14
IC3, IC13, IC14, IC15, IC16, IC18	6	OPA4134D	IO	SO14
IC9	1	4051D	IO	SO16
JP2	1	2 x 6 pinů	konektor	JP6Q
JP3, JP4, JP5	3	2 x 2 piny	konektor	JP2Q
L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9	9		tlumivka	SM-1206
Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q10, Q11, Q12, Q13, Q14, Q15, Q16, Q17, Q18, Q19, Q20, Q26	21	BC817-40	tranzistor	SOT23-BEC
Q25	1	ASF1	IO	ASF
R1, R10, R13, R16, R20, R28, R31, R34, R39, R47, R50, R53, R58, R66, R69, R72, R77, R85, R88, R91, R96, R97, R98, R99, R128, R133, R174, R176	28	10 kΩ/0,125 W	rezistor	M0805
R118, R119, R120, R121, R122, R123, R124, R125, R129, R130, R149, R150, R154, R158, R162, R166, R170	17	1 kΩ/0,125 W	rezistor	M0805
R126	1	360 Ω/0,125 W	rezistor	M0805
R127	1	91 Ω/0,125 W	rezistor	M0805
R131	1	330 Ω/0,125 W	rezistor	M0805
R132	1	75 Ω/0,125 W	rezistor	M0805
R142, R143, R144, R145, R146, R147, R148	7	47 Ω/0,125 W	rezistor	M0805

Seznam součástek korekční části - pokračování

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
R151, R152, R155, R156, R159, R160, R163, R164, R167, R168, R171, R172	12	15 Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R153, R157, R161, R165, R169, R173	6	100 Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R2, R3, R11, R12, R14, R15, R17, R18, R21, R22, R29, R30, R32, R33, R35, R36, R40, R41, R48, R49, R51, R52, R54, R55, R59, R60, R67, R68, R70, R71, R73, R74, R78, R79, R86, R87, R89, R90, R92, R93	40	5,6 k Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R4, R5, R6, R7, R23, R24, R25, R26, R42, R43, R44, R45, R61, R62, R63, R64, R80, R81, R82, R83	20	150 Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R8, R27, R46, R65, R84	5	4,7 k Ω /0,125 W	rezistor	M0805
R9, R19, R37, R38, R56, R57, R75, R76, R94, R95	10	0 R	rezistor	M0805
U\$1	1	STA310	IO	TQFP80
U\$2	1	PCM1680	IO	DB_R-PDSO-G28
U\$3, U\$5	2	ADG633	IO	TSSOP16
U\$6	1	AD5200	IO	MSOP10
U1, U2, U3, U4, U5	5	AD5206BRUZ10	IO	SOP65P640X1 20-24N
U7	1	AD5206BRUZ50	IO	SOP65P640X1 20-24N
X1	1	8 pinů	konektor	22-23-2081
X3	1	3 piny	konektor	22-23-2031
X4, X5	1	7 pinů	konektor	22-23-2071
X6, X7	1	2 piny	konektor	22-23-2021

B.3 Seznam součástek výkonového napájecího zdroje

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
TR1	1	250 V/16 A	síťový filtr	
TR2	1	100 mm ²	EI feritový transformátor	
TR3	1	683mm ²	EE feritový transformátor	
T2	1	BD677	tranzistor	TO126
T1	1	BC847	tranzistor	SOT23
R8, R9	2	4,7 kΩ/0,125 W	rezistor	R0805
R7	1	2,5 kΩ/0,5 W	trimr	CA6V
R6	1	2,2 kΩ/0,125 W	rezistor	R0805
R43	1	68 kΩ/0,125 W	rezistor	R0805
R42	1	2,7 kΩ/0,125 W	rezistor	R0805
R41	1	15 Ω/10 W	drátový rezistor	R__10W
R4, R5	2	100 kΩ/0,125 W	rezistor	R0805
R39, R40	2	100 kΩ/2 W	rezistor	0411/12
R3	1	8,2 kΩ/0,125 W	rezistor	R0805
R26	1	2,2 kΩ/3 W	drátový rezistor	R__5W
R25	1	6,8 Ω/2 W	rezistor	0411/15
R2	1	10 kΩ/0,125 W	rezistor	R0805
R19, R24	2	100 Ω/2 W	rezistor	0411/15
R18, R23	2	4,7 Ω/0,6 W	rezistor	0207/10
R16, R21	2	490 Ω/0,6 W	rezistor	0207/10
R15, R17, R20, R22	4	1 kΩ/0,6 W	rezistor	0207/10
R13	1	3,3 Ω/0,125 W	rezistor	R0805
R11	1	100 kΩ/0,5 W	trimr	CA6V
R10, R12, R14	3	1 kΩ/0,125 W	rezistor	R0805
R1	1	12 Ω/0,125 W	rezistor	R0805
Q3, Q5	2	IRQ4PC40	tranzistor	TO247BV
Q2, Q4	2	BC327	tranzistor	TO92
Q1	1	IRF530	tranzistor	TO220BV
OK1	1	PC817	optočlen	DIL04
K1	1	250 V/16 A	relé	AZ8
IC1	1	UC3845	IO	SO-08
F1	1		pojistkové pouzdro	SHK20Q
D9, D13	2	18 V/1,3 W	zenerova dioda	DO41Z10

Seznam součástek výkonového napájecího zdroje - pokračování

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
D6	1	SUF4007	dioda	SMA-DO214AC
D4, D5	2	3,9 V/1,3 W	zenerova dioda	DO41Z10
D3	1	5,6 V/1,3 W	zenerova dioda	DO41Z10
D29, D30, D31, D32	4	BYV42	dioda	TO220ABS
D28	1	1N4007	dioda	DO-214AC
D2	1	24 V/1,3 W	zenerova dioda	DO41Z10
D15, D16	2	FR607	dioda	AG
D10, D14	2	UF5408	dioda	DO201-15
D1, D7, D8, D11, D12	5	1N4148	dioda	DO35-7
CON1, CON2	2	FASTON_6,3	FASTON	FAST_63-08
C9	1	220 pF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C8	1	100 pF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C7	1	10 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C5	1	470 uF/25 V	elektrolytický kondenzátor	E5-10,5
C44	1	470 uF/25 V	elektrolytický kondenzátor	E5-10,5
C42, C43	2	470 nF/250 V	foliový kondenzátor	C150-072X183
C4	1	1 uF/ 16V	keramický kondenzátor	C0805K
C3	1	2,2 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C16, C17, C18	3	470u/25v	elektrolytický kondenzátor	EB30D
C15	1	4,7n/2kV	foliový kondenzátor	C075-032X103
C14, C45, C46, C47, C48, C49	6	680 uF/400 V	elektrolytický kondenzátor	EB22,5D
C11, C13	2	3,3u/250V	foliový kondenzátor	C375-192X418
C10, C12	2	2,2n/3kV	foliový kondenzátor	C075-032X103
C1, C2, C6	3	100 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K

Seznam součástek výkonového napájecího zdroje - pokračování

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
B1	1	B250C25000DR	Usměrňovací můstek	FB32
X1, X6	2	2 piny	konektor	22-23-2021
X8, X9, X10	3	2 piny	konektor	KK-156-2

B.4 Seznam součástek pomocného napájecího zdroje

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
X5	1	8 pinů	konektor	22-23-2081
X3, X4	2	2 piny	konektor	22-23-2021
R48	1	1 k Ω /0,125 W	rezistor	R0805
R47	1	10 k Ω /0,125 W	rezistor	R0805
R44, R45, R46, R49, R50	5	1 Ω /0,125 W	rezistor	R0805
R38	1	500 Ω /0,125 W	rezistor	R0805
R36	1	250 Ω /0,125 W	rezistor	R0805
R34	1	270 Ω /0,125 W	rezistor	R0805
R33, R37	2	240 Ω /0,125 W	rezistor	R0805
R32	1	130 Ω /0,125 W	rezistor	R0805
R27, R35	2	120 Ω /0,125 W	rezistor	R0805
L1, L2, L3, L4, L5	5	10 μ H	cívka	SFT830D
IC9, IC10	2	LM337	IO	TO220
IC7, IC8	2	LM317	IO	TO220
IC6	1	TS1117	IO	SOT223
IC5	1	7905	IO	TO220
IC4	1	7805	IO	TO220
IC2	1	7812	IO	TO220
IC11	1	MC34063AD	IO	SOIC8
D17	1	BYV32	dioda	TO220ABS
C35, C36, C39, C40	4	1 μ F/10 V	keramický kondenzátor	C0805K
C33	1	10 μ F/6,3 V	elektrolytický kondenzátor	C0805K
C27, C41	2	1000 μ F/16 V	elektrolytický kondenzátor	E5-10,5
C26, C30, C31, C32, C34, C37, C38	7	100 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C25	1	1 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K

Seznam součástek pomocného napájecího zdroje - pokračování

Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
C24, C28, C29	3	330 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C20, C23	2	1000 uF/25 V	elektrolytický kondenzátor	E5-13

B.5 Seznam součástek procesorové desky

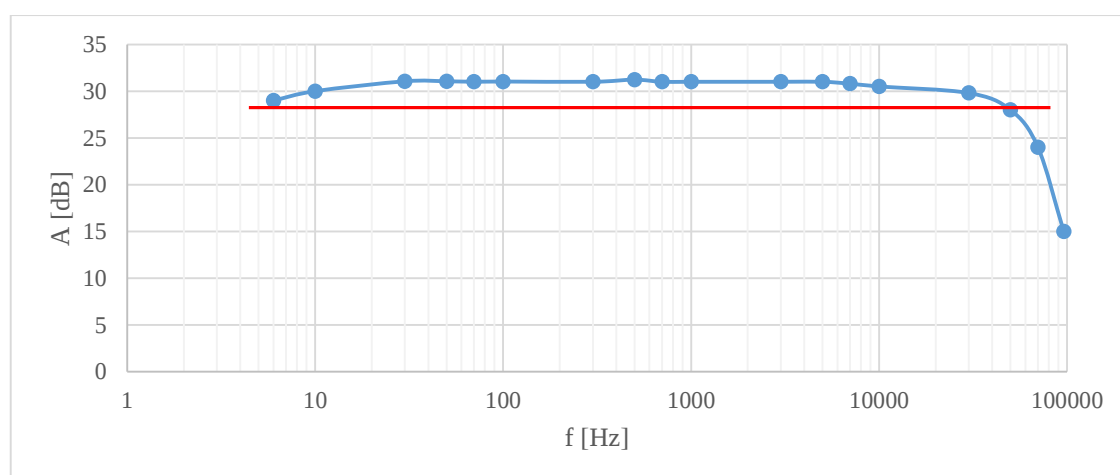
Označení součástky	Počet	Hodnota	Typ součástky	Pouzdro
C1, C2	2	100 nF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C3, C4	2	22 pF/63 V	keramický kondenzátor	C0805K
C5	1	100 uF/16 V	elektrolytický kondenzátor	E2,5-6
IC1	1	MEGA128-A	MCU	TQFP64
K1	1	COSMO RELES1A 050 000	relé	REED
L1, L2	2	10 uF/16 V	tlumivka	SM-1206
Q1	1	10 MHz	krystal	HC49UP
Q2, Q3, Q4, Q5, Q6	5	2N7002	tranzistor	SOT-23
R1, R2	2	10 k Ω /0,125 W	rezistor	R0805
R3, R4	2	220 Ω /0,125 W	rezistor	R0805
R5, R6, R7	3	4,7 k Ω /0,125 W	rezistor	R0805
X1, X9	2	6 pinů	konektor	22-23-2061
X2, X4	2	8 pinů	konektor	22-23-2081
X3, X6, X7	3	7 pinů	konektor	22-23-2071
X5	1	10 pinů	konektor	22-23-2101
X8	1	3 piny	konektor	22-23-2031

C MĚŘENÍ ZESILOVAČE

C.1 Modulová frekvenční charakteristika koncového stupně

f [Hz]	U _{out} [V]	A [dB]
6	2,85	29,10
10	3,18	30,05
30	3,57	31,06
50	3,57	31,06
70	3,55	31,00
100	3,56	31,03
300	3,68	31,32
500	3,64	31,23
700	3,68	31,32
1000	3,59	31,10
3000	3,61	31,15
5000	3,57	31,05
7000	3,46	30,78
10000	3,35	30,50
30000	3,06	29,71
50000	2,55	28,13
70000	1,61	24,14
96000	0,59	15,42
$U_{in} = 100 \text{ mV}, U_{nap} = 36 \text{ V}, R_z = 5,6 \text{ } \Omega$		

Tab. C.1: Tabulka hodnot modulové frekvenční charakteristiky.



Obr. C.1: Modulová frekvenční charakteristika koncového stupně.

Šířka pásma BW je 49,95 kHz, mezní kmitočty jsou 5 Hz a 50 kHz.

C.2 Odstupu signálu od šumu

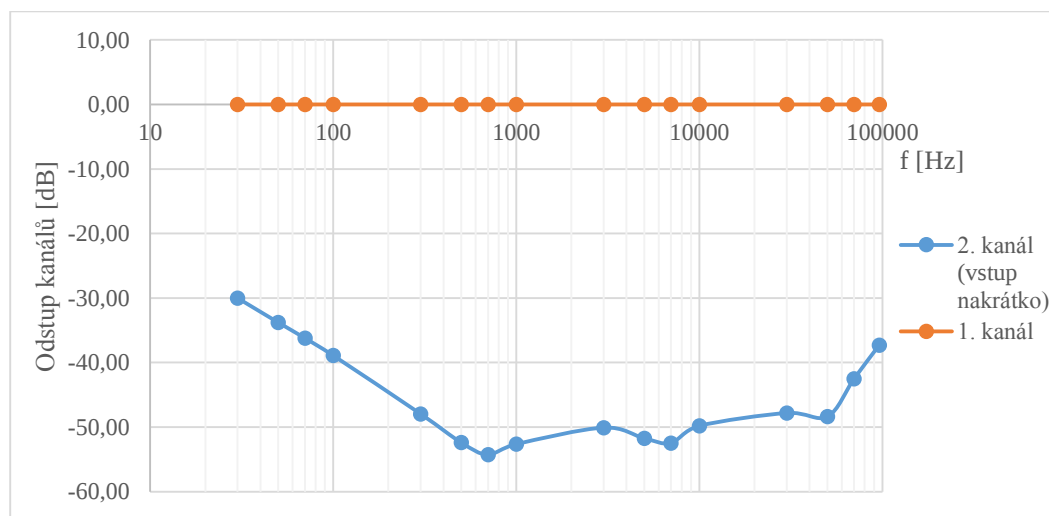
$U_{\text{šum}}$ [mV]	U_{max} [V]	Odstup signál od šumu [dB]
3	32	80,56
$R_z = 5,6 \Omega$, $U_{\text{nap}} = 50 \text{ V}$		

Tab. C.2: Tabulka měření odstupu signálu od šumu.

C.3 Přeslechy mezi kanály

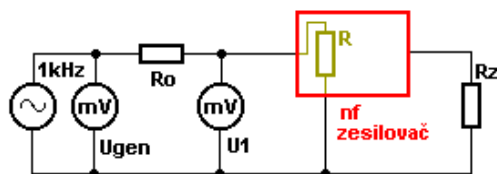
f [Hz]	$U_{\text{out-kanál 2}}$ [V]	Odstup kanálů [dB]
30	0,474	-30,01
50	0,307	-33,78
70	0,232	-36,21
100	0,17	-38,91
300	0,06	-47,96
500	0,036	-52,40
700	0,029	-54,27
1000	0,035	-52,64
3000	0,047	-50,08
5000	0,039	-51,74
7000	0,036	-52,46
10000	0,048	-49,81
30000	0,061	-47,81
50000	0,057	-48,38
70000	0,112	-42,50
96000	0,204	-37,31
$U_{\text{out-kanál 1}} = 15 \text{ V}$, $U_{\text{nap}} = 36 \text{ V}$, $R_z = 5,6 \Omega$		

Tab. C.3: Tabulka hodnot měření přeslechů mezi kanály.



Obr. C.2: Modulová závislost přeslechů mezi kanály na kmitočtu.

C.4 Vstupní impedance zesilovače

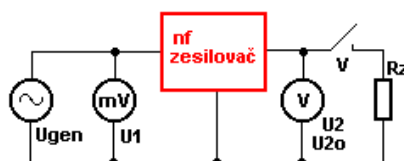


Obr. C.3: Schéma zapojení pro měření vstupní impedance zesilovače (převzato z [11]).

Číslo měření	U_{gen} [mV]	U_1 [mV]	R [k Ω]
1	201,30	34,63	25,784
2	403,60	69,30	25,791
$R_o = 30,22 \text{ k}\Omega$, $U_{\text{nap}} = 36 \text{ V}$, $R_z = 5,6 \Omega$			

Tab. C.4: Tabulka hodnot měření vstupní impedance zesilovače.

C.5 Výstupní impedance zesilovače



Obr. C.4: Schéma zapojení pro měření výstupní impedance zesilovače (převzato z [11]).

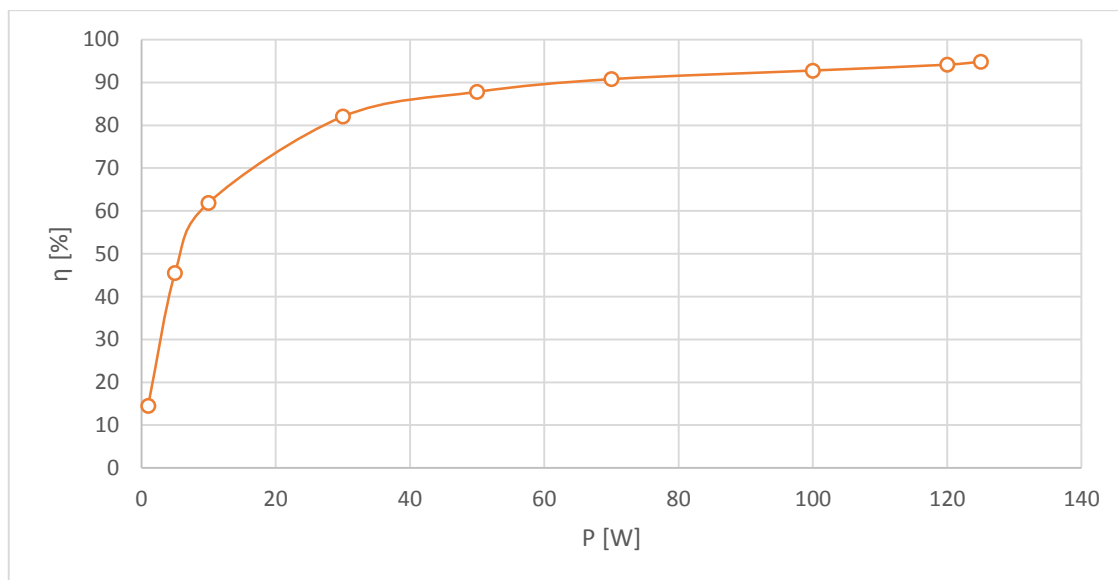
Číslo měření	U_{20} [V]	U_2 [V]	R [Ω]
1	17,243	13,434	0,616
2	12,136	15,484	0,638
$U_{\text{nap}} = 36 \text{ V}$, $R_z = 5,6 \Omega$			

Tab. C.5: Tabulka hodnot měření výstupní impedance zesilovače.

C.6 Účinnost koncového stupně (jeden kanál)

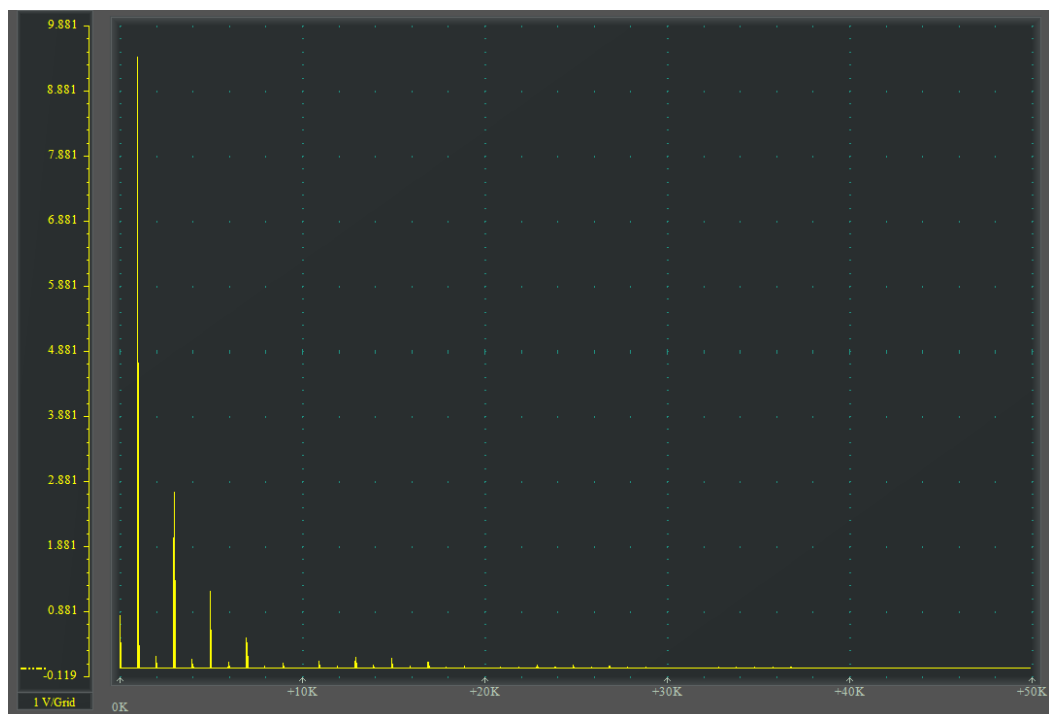
U_{nap} [V]	I_{nap} [A]	$P_{\text{výstup}}$ [W]	η [%]
47,80	0,14	6,89	14,52
47,60	0,23	10,99	45,50
47,40	0,34	16,15	61,90
46,90	0,78	36,57	82,04
46,30	1,23	56,95	87,80
45,80	1,68	77,11	90,78
45,00	2,40	107,78	92,78
44,30	2,88	127,47	94,14
44,10	2,99	131,80	94,84
$R_z = 5 \Omega, f_{\text{gen}} = 1\text{kHz}, P_{\text{řídící obvody}} = 2,4 \text{ W}$			

Tab. C.6: Tabulka hodnot měření účinnosti koncového stupně.

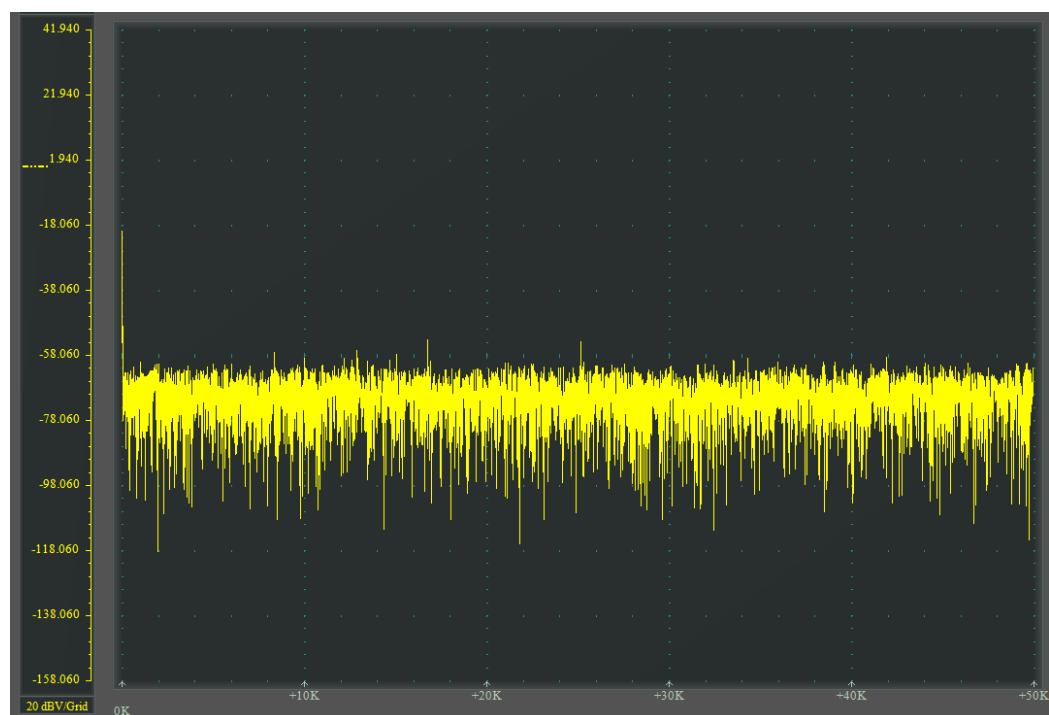


Obr. C.5: Závislost účinnosti na výstupním výkonu.

C.7 Výstupní spektrum koncového stupně



Obr. C.6: Výstupní spektrum koncového stupně - $f_{gen} = 1$ kHz, $P_{out} = 97$ W, $R_z = 5,6 \Omega$.



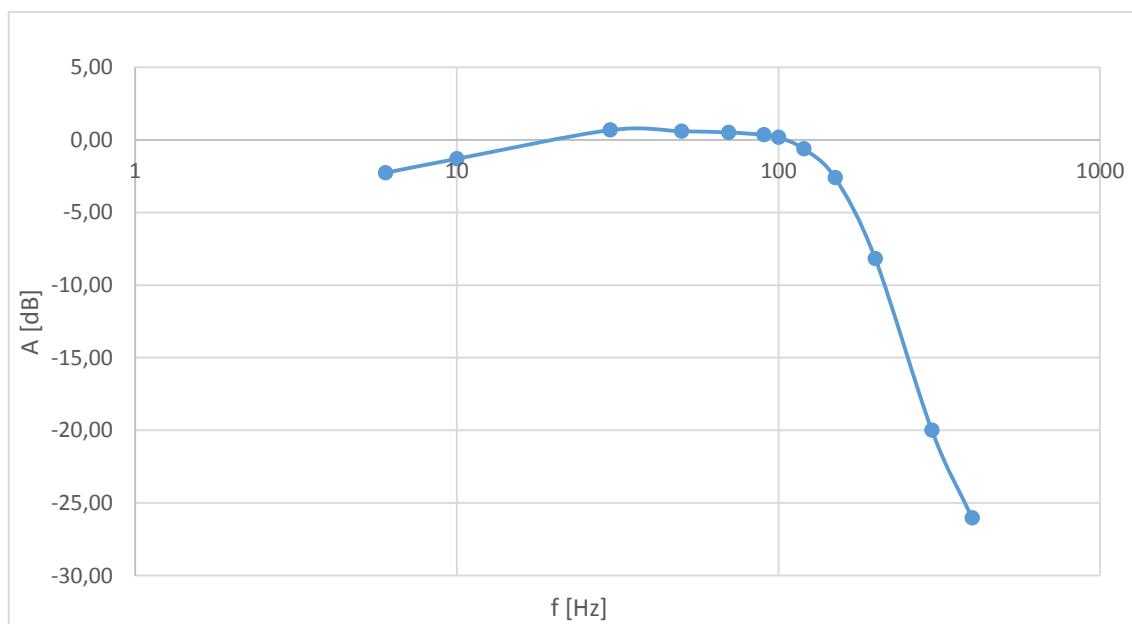
Obr. C.7: Výstupní spektrum koncového stupně - vstup nakrátko.

D MĚŘENÍ KOREKČNÍ ČÁSTI

D.1 Modulová frekvenční charakteristika LFE kanálu

f [Hz]	U _{výstupní} [V]	A [dB]
6	0,077	-2,27
10	0,086	-1,31
30	0,108	0,67
50	0,107	0,59
70	0,106	0,51
90	0,104	0,34
100	0,102	0,17
120	0,093	-0,63
150	0,074	-2,62
200	0,039	-8,18
300	0,010	-20,00
400	0,005	-26,02
$U_{vstupní} = 100 \text{ mV}$		

Tab. D.1: Tabulka hodnot měření modulové frekvenční charakteristiky LFE kanálu.



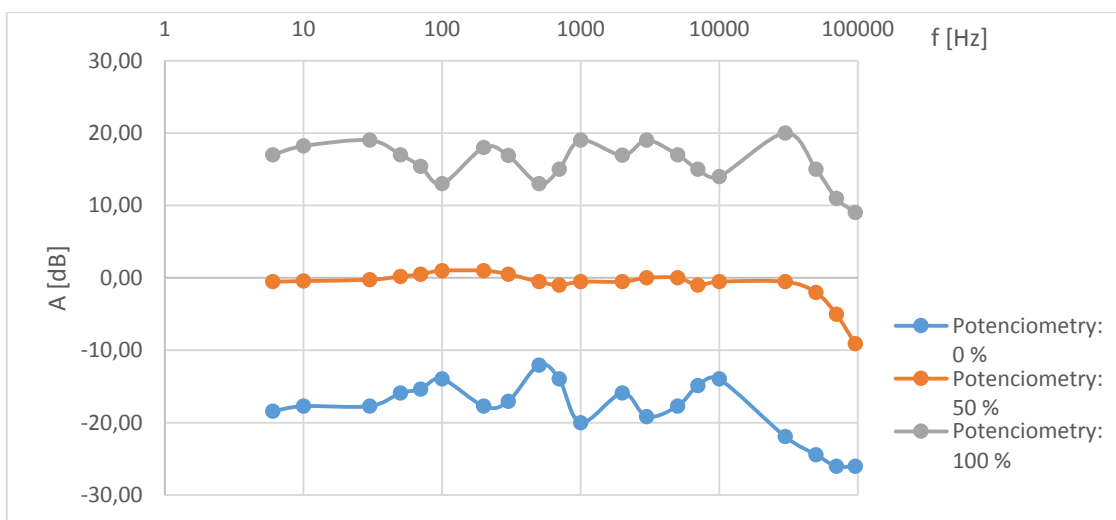
Obr. D.1: Modulová frekvenční charakteristika LFE kanálu.

D.2 Modulová frekvenční charakteristika pěti pásmového ekvalizéru

f [Hz]	U _{výstupní} [V]			A [dB]		
	Potenc.: 0%	Potenc.: 50%	Potenc.: 100%	Potenc.: 0%	Potenc.: 50%	Potenc.: 100%
6	0,012	0,094	0,707	-18,42	-0,54	16,99
10	0,013	0,095	0,813	-17,72	-0,45	18,20
30	0,013	0,097	0,891	-17,72	-0,26	19,00
50	0,016	0,102	0,708	-15,92	0,17	17,00
70	0,017	0,106	0,589	-15,39	0,51	15,40
100	0,02	0,112	0,447	-13,98	0,98	13,01
200	0,013	0,112	0,794	-17,72	0,98	18,00
300	0,014	0,106	0,698	-17,08	0,51	16,88
500	0,025	0,094	0,447	-12,04	-0,54	13,01
700	0,02	0,089	0,562	-13,98	-1,01	14,99
1000	0,01	0,094	0,891	-20,00	-0,54	19,00
2000	0,016	0,094	0,702	-15,92	-0,54	16,93
3000	0,011	0,1	0,891	-19,17	0,00	19,00
5000	0,013	0,1	0,707	-17,72	0,00	16,99
7000	0,018	0,089	0,562	-14,89	-1,01	14,99
10000	0,02	0,094	0,501	-13,98	-0,54	14,00
30000	0,008	0,094	0,999	-21,94	-0,54	19,99
50000	0,006	0,079	0,562	-24,44	-2,05	14,99
70000	0,005	0,056	0,354	-26,02	-5,04	10,98
96000	0,005	0,035	0,282	-26,02	-9,12	9,00

$U_{vstupní} = 100 \text{ mV}$

Tab. D.2: Tabulka hodnot měření frekvenční charakteristiky ekvalizéru.



Obr. D.2: Modulová frekvenční charakteristika ekvalizéru.

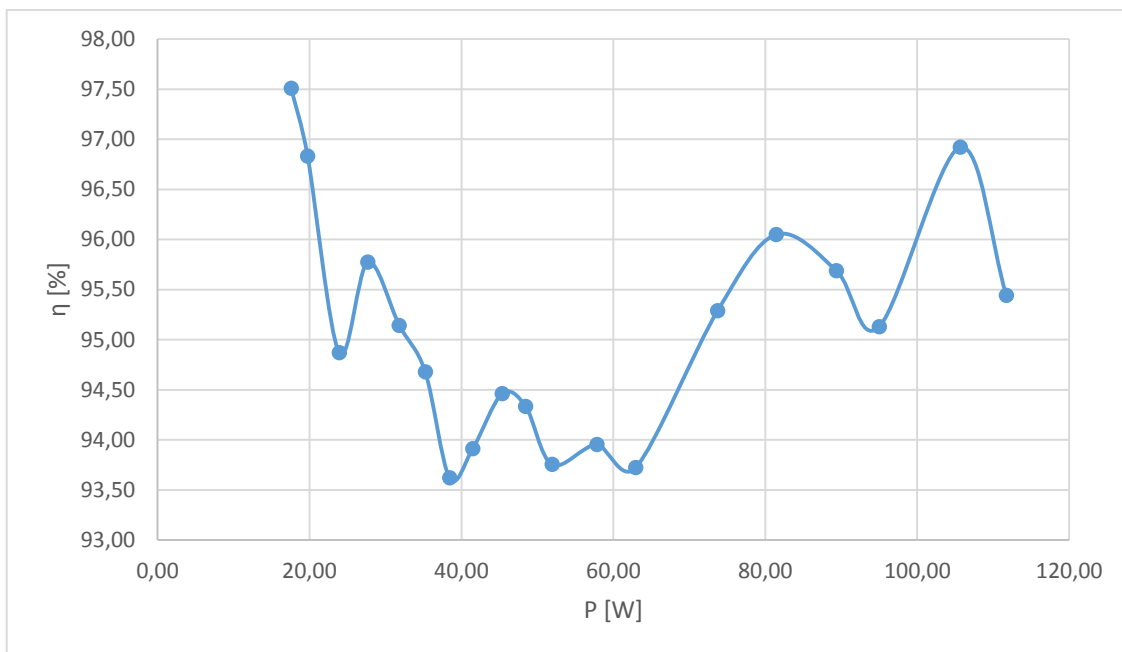
E MĚŘENÍ NAPÁJECÍHO ZDROJE

E.1 Zatěžovací charakteristika výkonového zdroje

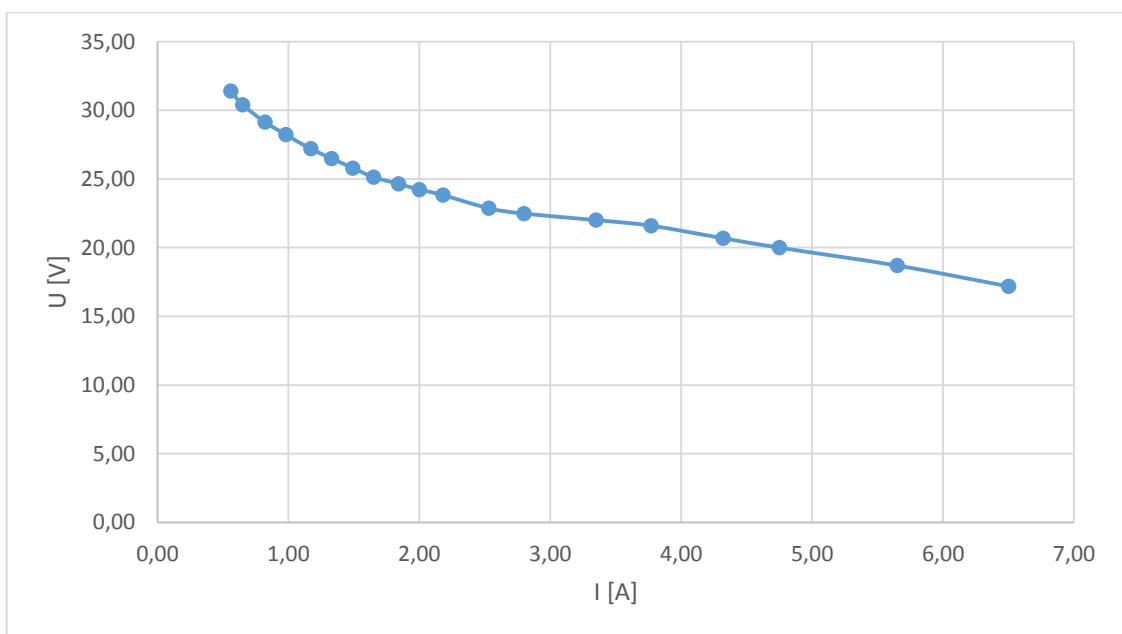
Všechny měření výkonového zdroje byly provedeny s napájecím napětím 60 V.

$U_{\text{napájecí}} [\text{V}]$	$I_{\text{napájecí}} [\text{A}]$	$U_{\text{výstupní}} [\text{V}]$	$I_{\text{výstupní}} [\text{A}]$	$P_{\text{napájecí}} [\text{W}]$	$P_{\text{výstupní}} [\text{W}]$	$\eta [\%]$
60,11	0,30	31,40	0,56	18,03	17,58	97,51
60,02	0,34	30,40	0,65	20,41	19,76	96,83
59,99	0,42	29,15	0,82	25,20	23,90	94,87
60,18	0,48	28,23	0,98	28,89	27,67	95,77
59,73	0,56	27,20	1,17	33,45	31,82	95,14
59,09	0,63	26,50	1,33	37,23	35,25	94,68
58,66	0,70	25,80	1,49	41,06	38,44	93,62
58,12	0,76	25,14	1,65	44,17	41,48	93,91
57,85	0,83	24,65	1,84	48,02	45,36	94,46
57,72	0,89	24,23	2,00	51,37	48,46	94,33
57,72	0,96	23,83	2,18	55,41	51,95	93,75
58,10	1,06	22,87	2,53	61,59	57,86	93,95
58,40	1,15	22,48	2,80	67,16	62,94	93,72
58,62	1,32	22,01	3,35	77,38	73,73	95,29
58,47	1,45	21,60	3,77	84,78	81,43	96,05
57,66	1,62	20,69	4,32	93,41	89,38	95,69
55,48	1,80	20,00	4,75	99,86	95,00	95,13
53,70	2,03	18,70	5,65	109,01	105,66	96,92
50,90	2,30	17,19	6,50	117,07	111,74	95,44
Příkon řídicí části a obvodů soft start je 1,95 W						

Tab. E.1: Tabulka hodnot měření zatěžovací charakteristiky výkonového zdroje.

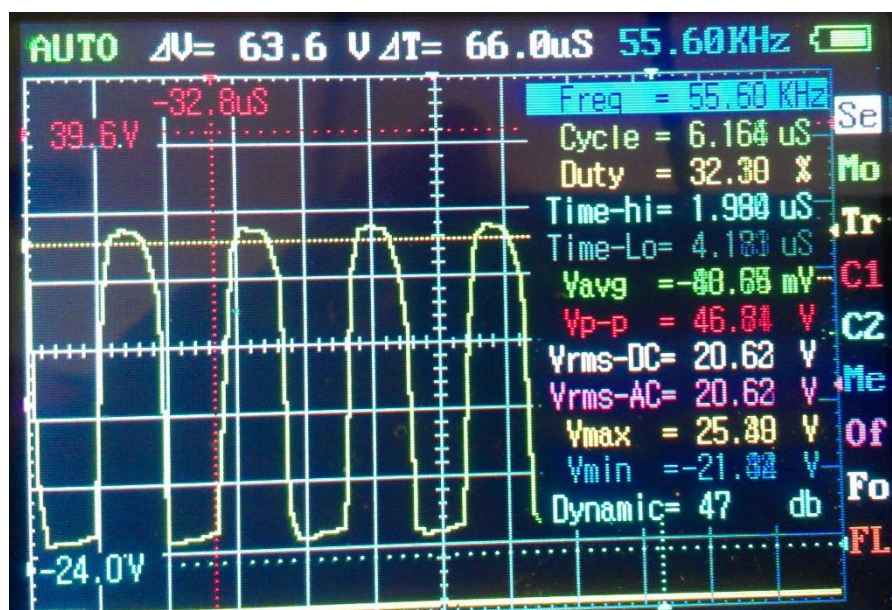


Obr. E.8: Závislost účinnosti na výstupním výkonu výkonového zdroje.

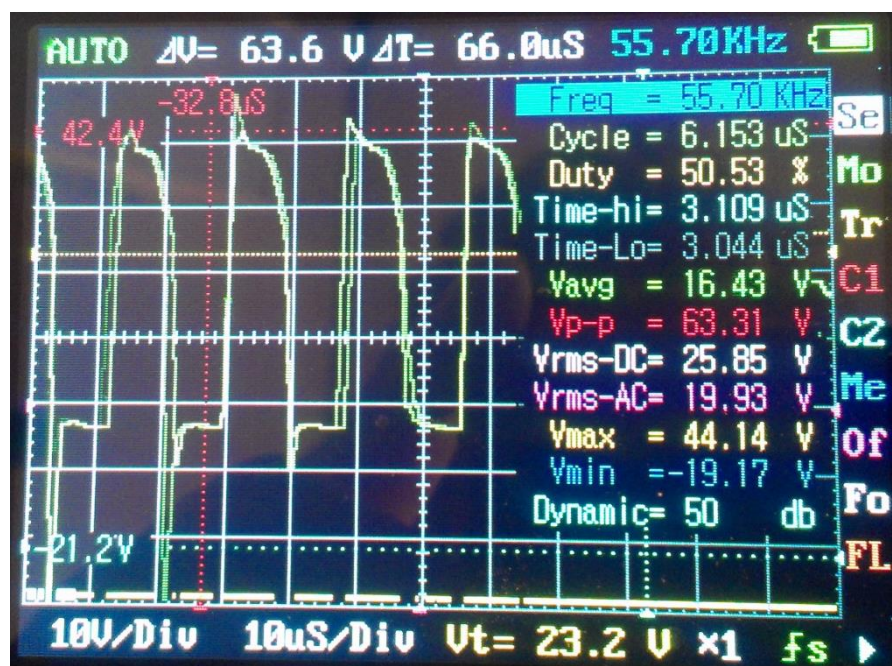


Obr. E.2: Zatěžovací charakteristika výkonového zdroje.

E.2 Průběh napětí na impulzním transformátoru

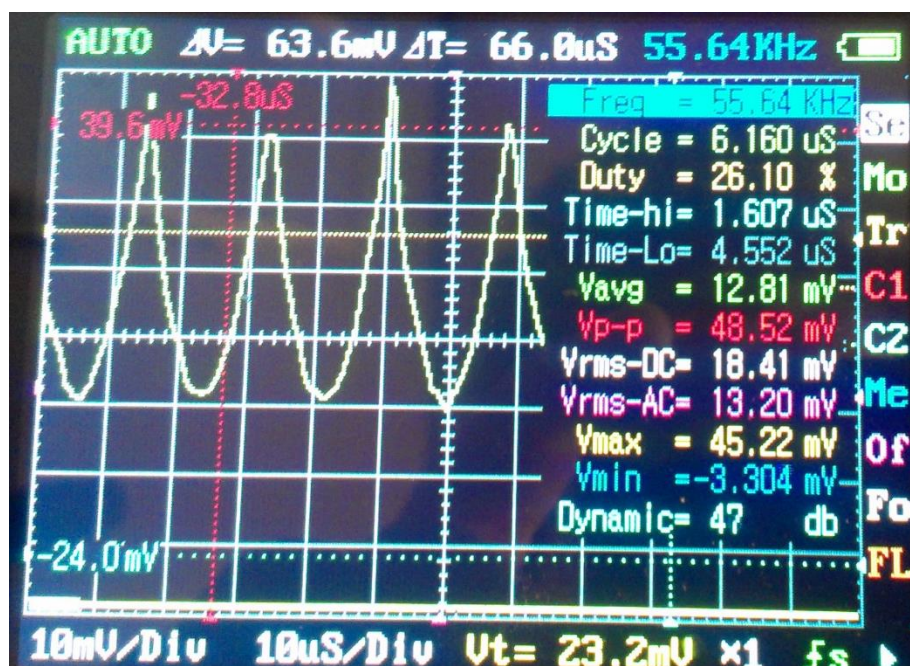


Obr. E.3: Průběh napětí na výkonovém transformátoru - $P_{\text{výstupní}} = 112 \text{ W}$, $U_{\text{napájecí}} = 51 \text{ V}$.

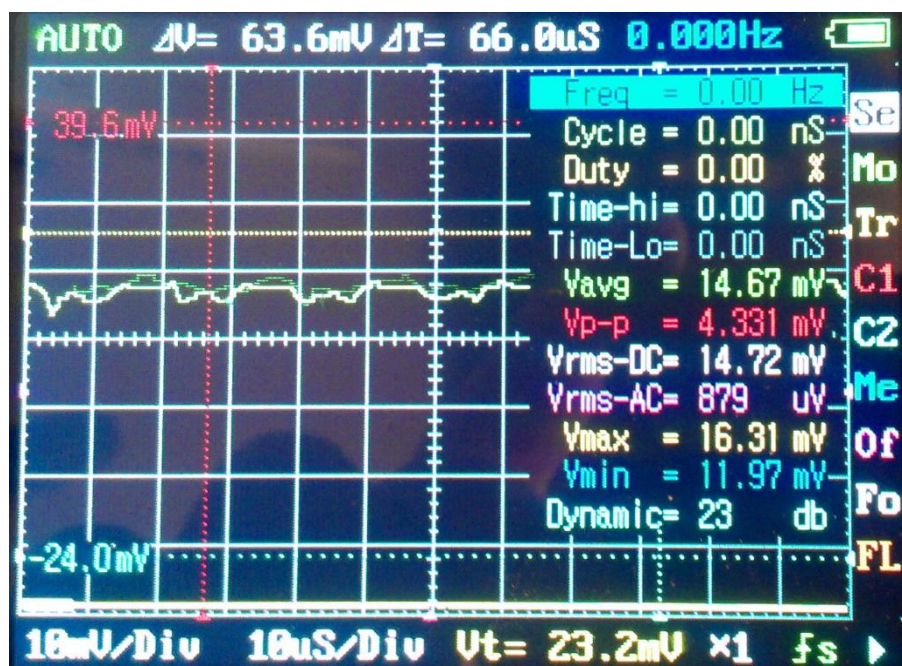


Obr. E.4: Průběh napětí na výkonovém transformátoru – naprázdno.

E.3 Zvlnění výstupního napětí výkonového zdroje



Obr. E.5: Zvlnění výstupního napětí - $P_{\text{výstupní}} = 112\text{ W}$, $U_{\text{napájecí}} = 51\text{ V}$.

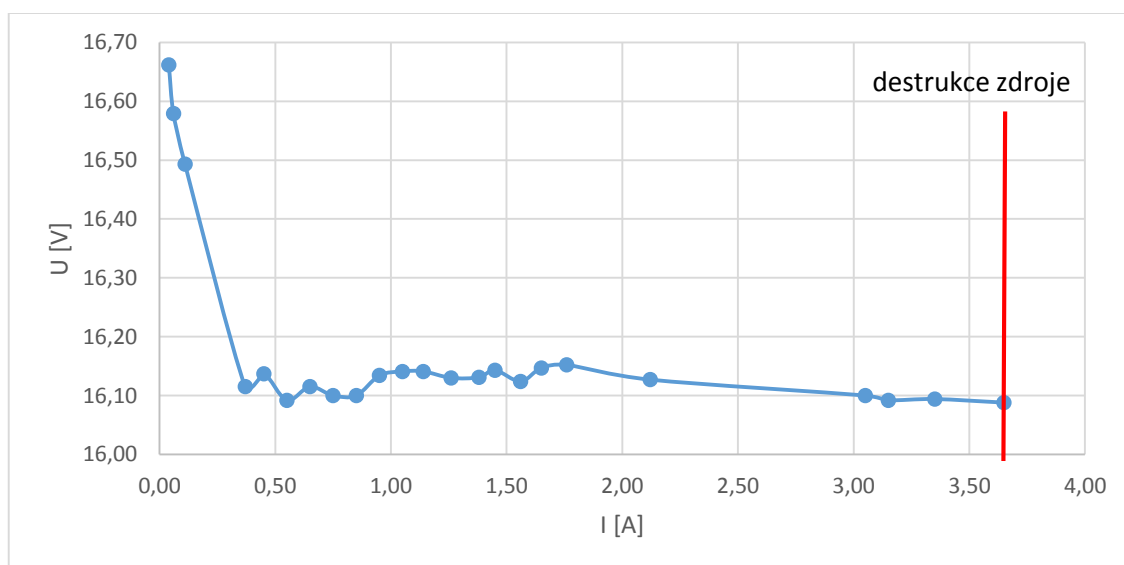


Obr. E.6: Zvlnění výstupního napětí – naprázdno.

E.4 Zatěžovací charakteristika pomocného zdroje

$U_{\text{výstupní}} [\text{V}]$	$I_{\text{výstupní}} [\text{A}]$	$P_{\text{výstupní}} [\text{W}]$
16,66	0,04	0,67
16,58	0,06	0,99
16,49	0,11	1,81
16,12	0,37	5,96
16,14	0,45	7,26
16,09	0,55	8,85
16,12	0,65	10,47
16,10	0,75	12,08
16,10	0,85	13,69
16,13	0,95	15,33
16,14	1,05	16,95
16,14	1,14	18,40
16,13	1,26	20,32
16,13	1,38	22,26
16,14	1,45	23,41
16,12	1,56	25,15
16,15	1,65	26,64
16,15	1,76	28,43
16,13	2,12	34,19
16,10	3,05	49,11
16,09	3,15	50,69
16,09	3,35	53,91
16,09	3,65	58,72

Tab. E.2: Tabulka měření zatěžovací charakteristiky pomocného zdroje.



Obr. E.79: Zatěžovací charakteristika pomocného zdroje.

OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- text bakalářské práce
- schémata všech částí zesilovače ve vysokém rozlišení
- výkresová dokumentace pro výrobu DPS ve vysokém rozlišení, včetně osazovacích plánů
- výkresová dokumentace pro konstrukci dřevěného úložného boxu