

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

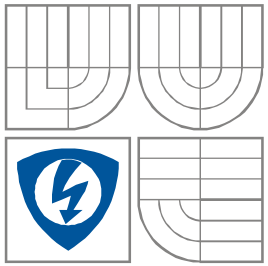
NÁVRH A REALIZACE NÍZKOFREKVENČNÍHO VÝKONOVÉHO ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ AB

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN DUŠEK

BRNO 2008

	VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH A REALIZACE NÍZKOFREKVENČNÍHO VÝKONOVÉHO ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ AB

DESIGN AND MAKING OF LOW-FREQUENCY POWER AMPLIFIER IN CLASS AB

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin Dušek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

BRNO, 2008

1 Zadání

Abstrakt:

V této bakalářské práci se zabývám nízkofrekvenčními koncovými zesilovači, jejich důležitými parametry, třídami a zapojeními koncových stupňů. Dále se zabývá různými druhy předzesilovačů a doplňkových obvodů. Jsou zde odsimulovány návrhy řešení korekčního předzesilovače, obvodu ochran a koncového výkonového stupně zesilovače v programu PSpice. Návrhy těchto a dalších doplňkových modulů jsou doplněny deskami plošných spojů. Práce obsahuje výsledky měření a fotografie funkčního vzorku.

Klíčová slova:

Nízkofrekvenční zesilovač, předzesilovač, korekční předzesilovač, výkonový zesilovač, třídy zesilovačů, třída AB, ochranné obvody, indikace limitace, mikroprocesor, ovládání, softstart, napájecí zdroj, subsonický filtr, simulace.

Abstract:

In this bachelor thesis I am occupied with low frequency amplifiers, their important parameters, classes and with integrations end-level. Next I am occupied with miscellaneous types of preamplifiers and additional circuits. There are simulated schemes of corrective preamplifier, protection scheme and high power amplifier in PSpice software in this thesis. These schemes and next additional modules are connected with DPS. This thesis contains result of measurement and photo functional sample.

Keywords:

Low frequency amplifier, AF amplifier, audio amplifier, pre-amplifier, correction amplifier, high power amplifier, classes of amplifier, AB class, protective circuits, limit detector, microprocessor, command, softstart, power supply unit, subsonic filter, simulation.

Bibliografická citace:

DUŠEK, M. *Návrh a realizace nízkofrekvenčního výkonového zesilovače ve třídě AB: bakalářská práce.* Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 87 s

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Martin Dušek
Bytem: Bukovina nad Labem 56, Staré Hradiště, 53352, okr. Pardubice
Narozen/a (datum a místo): 2. října 1985 v Pardubicích

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh a realizace nízkofrekvenčního výkonového zesilovače ve třídě AB

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činnost dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejím textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh a realizace nízkofrekvenčního výkonového zesilovače ve třídě AB jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Lubomíru Brančíkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Obsah:

Obsah:	6
1 Úvod	9
1.1 Nf zesilovač	9
1.2 Parametry zesilovačů třídy HIFI	9
1.3 Třídy NF zesilovačů	10
1.4 Třída AB	11
1.4.1 Popis třídy B a AB, změna třídy B na třídu AB	11
1.4.2 Realizace předpětí báze	11
1.4.3 Teplotní stabilizace klidového proudu	12
1.4.4 Různá zapojení koncových tranzistorů	12
1.4.5 Komplementární dvojice	13
1.4.6 Komplementární Darlingtnova dvojice	13
1.4.7 Kvazikomplementární zapojení	13
1.5 Další části zesilovače	13
1.5.1 Ochrana výstupních tranzistorů proti nadměrnému proudu	13
1.5.2 Předzesilovač	13
1.5.3 Korekční zesilovač a ekvalizér	14
1.5.4 Další obvody nejen ochrany	14
2 Vlastní elektronické řešení zesilovače	15
2.1 Blokové schéma navrhovaného řešení	15
2.2 Předmluva k navrhovanému řešení	16
2.3 Korekční předzesilovač	17
2.3.1 Schéma pro simulace	17
2.3.2 Popis a zapojení	17
2.3.3 Výsledky simulací v PSpice	18
2.3.4 Schéma zapojení pro výrobu DPS	20
2.3.5 Deska plošných spojů	21
2.3.6 Osazovací výkres	22
2.3.7 Seznam součástek	23
2.4 Koncový stupeň zesilovače	24
2.4.1 Průběžný vývoj	24
2.4.2 Popis zapojení celosymetrické verze	24
2.4.3 Popis zapojení a úprav nesymetrické verze koncového stupně	26
2.4.4 Celosymetrické zapojení koncového stupně	27
2.4.5 Nesymetrické zapojení koncového stupně	28
2.4.6 Výsledky simulací v PSpice	29
2.4.7 Schéma zapojení pro návrh DPS	34
2.4.8 Deska plošných spojů	35
2.4.9 Osazovací výkres	36
2.4.10 Seznam součástek	37
2.4.11 Seznam změn pro osazení nesymetrické verze	38
2.5 Obvod ochrany a signalizace limitace koncového stupně	39
2.5.1 Popis a zapojení	39
2.5.2 Výsledky simulací v PSpice	40
2.5.3 Schéma zapojení pro návrh DPS	41
2.5.4 Deska plošných spojů	42
2.5.5 Osazovací výkres	42
2.5.6 Seznam součástek	43

2.6	Obvod mikroprocesorového ovládání zesilovače	44
2.6.1	Popis a zapojení.....	44
2.6.2	Schéma zapojení pro návrh DPS	45
2.6.3	Deska plošných spojů.....	46
2.6.4	Osazovací výkres.....	46
2.6.5	Seznam součástek.....	47
2.7	Obvod přepínače vstupů.....	48
2.7.1	Popis a zapojení.....	48
2.7.2	Schéma zapojení pro návrh DPS	49
2.7.3	Deska plošných spojů.....	50
2.7.4	Osazovací výkres.....	50
2.7.5	Seznam součástek.....	51
2.8	Obvod pomocného napájení pro zesilovač.....	52
2.8.1	Popis a zapojení.....	52
2.8.2	Schéma zapojení pro návrh DPS	53
2.8.3	Deska plošných spojů.....	53
2.8.4	Osazovací výkres.....	54
2.8.5	Seznam součástek.....	54
2.9	Obvod softstartu	55
2.9.1	Popis a zapojení.....	55
2.9.2	Schéma zapojení pro návrh DPS	56
2.9.3	Deska plošných spojů.....	56
2.9.4	Osazovací výkres.....	56
2.9.5	Seznam součástek.....	57
2.9.6	Výsledek simulace.....	57
3	Mechanické a konstrukční řešení	58
3.1	Transformátor.....	58
3.2	Chlazení.....	59
3.3	Přístrojová skříň	60
3.3.1	Řešení přístrojové skříně.....	60
3.3.2	Výkres skříně.....	60
3.3.3	Výkres předního panelu	62
3.3.4	Výkres zadního panelu	63
3.4	Fotky realizace	64
4	Výsledky měření realizovaného vzorku	67
4.1	Korekční předzesilovač	67
4.1.1	Frekvenční charakteristika	67
4.1.2	Vliv zapnutí obvodu pro potlačení korekcí.....	69
4.1.3	Zkreslení korekčního zesilovače	71
4.1.4	Další naměřené hodnoty	71
4.1.5	Průběhy naměřené na osciloskopu	72
4.2	Koncový stupeň.....	74
4.2.1	Frekvenční charakteristika a zkreslení	74
4.2.2	Průběhy naměřené na osciloskopu	76
5	Závěr.....	78
	Seznam použité literatury	79
	Seznam použitých obrázků	80
	Seznam tabulek	82
	Seznam grafů	82
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	83

Příloha:	84
Výpis programu pro mikroprocesorové ovládání:	84

1 Úvod

1.1 Nf zesilovač

Zesilovač je zařízení, které slouží k zesílení signálů. Zesílení může být napěťové, proudové a výkonové. Zesilovače lze dále dělit dle frekvenčního pásma, které zpracovává a to na stejnosměrné, nízkofrekvenční, vysokofrekvenční a širokopásmové.

Nízkofrekvenční (dále jen nf) zesilovač zesiluje tzv. akustické frekvenční pásmo, tj. pásmo v rozmezí 20Hz – 20kHz. Nf zesilovače dělíme dále na předzesilovače a výkonové zesilovače. Koncový zesilovač obsahuje většinou obě tyto části. Nejčastěji se můžeme setkat s koncovými zesilovači, které se skládají z těchto částí: přepínač vstupů, korekční zesilovač s funkcí loudness, výkonový zesilovač s ochranami a opožděným připojením zátěže a napájecí zdroj. Mohou také obsahovat různé indikace, dálkové ovládání a další drobnosti pro zpříjemnění poslechu nebo pohodlí uživatele.

V této práci se budu zabývat koncovým zesilovačem, který zpracovává na vstupu linkové úrovně tj. napětí do 0,775 V, měl by splňovat normy HI-FI, obsahovat součásti standardního koncového zesilovače a byl dostatečně výkonný, aby pokryl poslech náročnějšího posluchače bez výraznějšího omezení dynamiky a případně postačil na ozvučení menších venkovních akcí.

1.2 Parametry zesilovačů třídy HIFI

Dle normy DIN 45 500 je třída HIFI určena těmito parametry:

- výkon koncového zesilovače: min. 2x6W pro stereofonní přístroj
- zkreslení: nižší než 1% v pásmu 40Hz-12,5kHz
- přeslechy mezi kanály: minimálně 40dB
- přeslechy mezi jednotlivými vstupy: minimálně 50dB pro 1kHz
- odstup cizích a rušivých napětí: minimálně 50dB při výkonu 50mW

Další parametry koncových zesilovačů dle DIN a IEC:

- vstupní citlivost: velikost vstup. napětí, pro dosažení jmenovitého výstupního výkonu
- přenosové pásmo: pro lineární vstup ± 1 dB v pásmu 40Hz-16kHz (ref. zesílení: 1kHz)
- odchylka mezi stereofonními kanály: nemá-li regulátor vyvážení, je povolena odchylka 3dB pro pásmo 250-6300 Hz (i pro zisk -20 a -40 dB)
- harmonické zkreslení: 0,7% pro pásmo 40Hz-12,5kHz
- intermodulační zkreslení: 2% pro signal 250Hz (4x vyšší amplituda) a 8kHz
- jmenovitý výstupní výkon: pro sinusový průběh po dobu min. 10min a zkreslení nesmí být větší než 0,7%
- výkonová šířka pásma: frekvenční rozsah, na kterém výstupní výkon poklesne o 3 dB
- vstupní impedance: normovaná je 47k Ω /250pF (opt. 10x výstup. impedance zdroje)
- výstupní impedance: udává jakou optimální zátěž zvolit, většinou 4, 8, 16 nebo 100 Ω
- vnitřní odpor zesilovače: dle normy max. 1/3 výstup. impedance pro 40Hz-12,5kHz
- činitel tlumení: poměr zatěžovací a vnitřní impedance, dle normy minimálně 3

1.3 Třídy NF zesilovačů

Třída A

V třídě A výkonové součástky pracují v jednočinném zapojení. Tyto součástky mají nastaven klidový proud tak, aby stále byly v aktivním stavu, tj. pracují zhruba uprostřed své lineární pracovní oblasti. V tomto nastavení mají nejmenší zkreslení signálu, ale velký příkon a ztrátový výkon. Mají malou účinnost a potřebu velmi dobrého chlazení výkonových součástek.

Tato třída se používá především v High-end zesilovačích, pro výkony do cca 20W. Pro větší výkony je zesilovač velmi veliký a těžký, zejména kvůli parametrům chladících profilů.

Třída B

V této třídě pracují výkonové součástky ve dvojčinném zapojení s nulovým klidovým proudem. Každá půlvlna vstupního signálu je zpracovávána v jedné polovině koncového stupně, tzn. výkonové součástky se střídají v činnosti podle polarit vstupního signálu. Při přechodu z vodivého do nevodivého stavu jsou součástky v obou polovinách koncového stupně uzavřeny a tím vzniká nelineární zkreslení signálu, tzv. přechodové zkreslení.

Výhodou je vyšší účinnost, nulový klidový proud, menší ztrátový výkon a oproti třídě A daleko menší nároky na chlazení.

Základní zapojení koncového stupně v této třídě je na Obr. 1.1.

Třída AB

Je kompromisem mezi třídou A a B. Z hlediska funkce se jedná o třídu B, do níž je zaveden malý klidový proud (řádově desítky až stovky mA), který výrazně zmenšuje přechodové zkreslení. Možné zavedení klidového proudu je na Obr. 1.2.

Oproti třídě B má nepatrně větší spotřebu a tím pádem menší účinnost. Tato třída je používána v konstrukci běžných nf zesilovačů nejčastěji.

Třída C

Výkonové součástky přecházejí z nevodivého do aktivního stavu až ve špičkách vstupního signálu. Zkreslení výstupního signálu je mnohem výraznější než ve třídě B.

V nf technice je tato třída nepoužitelná. Používá se ve vysokofrekvenční technice v jednočinném nebo dvojčinném zapojení ve vysílačích.

Třída D

Nepatří do kategorie lineárních zesilovačů, jelikož zpracování signálu využívá techniku PWM (pulsně šířkové modulace). Označuje se jako digitální zesilovač. Díky použití spínacího režimu tranzistorů má relativně vysokou účinnost (více jak 80%), což je jeho největší přednost. Ovšem má mnohonásobně větší zkreslení ve srovnání se třídami A a AB.

Třída G

Jedná se o koncový stupeň, který je většinou v třídě AB a má dvou nebo i vícestupňové napájení koncových tranzistorů. Velikost napájecího napětí se přizpůsobuje velikosti požadovaného výstupního výkonu, tj. pro malé výkony pracuje zesilovač s menším napájecím napětím, po přesáhnutí výstupního výkonu přes určitou velikost se připojí vyšší napájecí napětí.

Výhodou je zvětšená účinnost oproti klasické třídě AB a menší konstrukční rozměry zesilovače. Nevýhodou je složitější návrh zapojení.

Třída H

Je shodná s třídou G, pouze velikost napájecího napětí se nemění skokově, ale přesně sleduje velikost vstupního signálu. Napájecí napětí je na takové úrovni, aby na výkonových součástkách zesilovače byl vždy konstantní úbytek napětí.

Výhodou je větší účinnost oproti třídě G, nevýhodou ještě složitější návrh zapojení.

Třída S

Je podobné třídě D, ale díky implementaci nových digitálních metod zpracování již nepotřebuje na výstupu LC filtr, který zde byl ve funkci dolní propusti, potlačoval vlivy spínacího kmitočtu a dalších produktů spínání.

Třída T

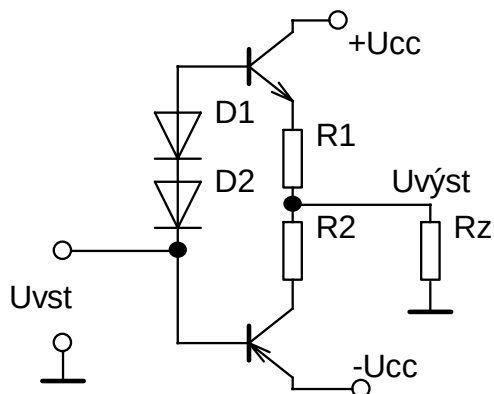
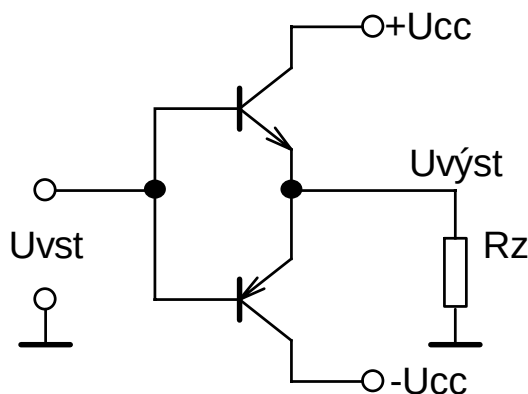
Označení bylo zavedeno firmou Tripath. Je podobná třídě D, ale díky použití vylepšeného a dobře propracovaného algoritmu řízení má vylepšené parametry. Výsledkem je účinnost kolem 90%, vynikající zvukové parametry, zkreslení pod 0,1% a malé nároky na chlazení.

1.4 Třída AB

1.4.1 Popis třídy B a AB, změna třídy B na třídu AB

Jak bylo již napsáno v úvodu jedná se o třídu, ve které dodávají energii do výstupu dva (při paralelním řazení i více) výkonové prvky (Obr. 1.1), které se střídají v činnosti a každý zesiluje jednu půlvlnu. Jelikož se tranzistory otevírají až od napětí na bázi cca 0,5V (U_{be}), projevuje se zde přechodové zkreslení, díky kterému se nezesilují a nebo jsou silně zkresleny malé signály.

Tento jev se dá odstranit tím, že mezi báze obou výkonových prvků dáme předpětí (Obr. 1.2 zajišťují ho diody D1 a D2), díky kterému bude tranzistor neustále pootevřen a bude jím protékat malý klidový proud. Tento malý proud (řádově desítky až stovka mA) právě odlišuje třídu AB od třídy B.



Obr. 1.1 Koncové tranzistory bez předpětí (tř. B) Obr. 1.2 Koncové tranzistory s předpětím (tř. AB)

1.4.2 Realizace předpětí báze

Jako zdroj předpětí bází lze použít např. křemíkovou diodu (Obr. 1.2), která se vsadí do obvodu budiče koncových tranzistorů. Ta má v propustném směru stejnou hodnotu propustného napětí jako přechod B-E a její malý diferenciální odpor téměř neovlivní výstupní střídavý signál budiče. Je-li výstupní obvod realizován tranzistory v Darlingtonově zapojení, je třeba použít více diod v sérii, nebo Zenerovu diodu.

Další možností vytvoření předpětí je použití tranzistoru, u kterého se předpětí reguluje děličem napětí na bázi. Obvod se chová jako Zenerova dioda s proměnným napětím U_{ak} .

1.4.3 Teplotní stabilizace klidového proudu

Klidový proud by měl být v celém rozsahu pracovních teplot konstantní. Jelikož v zesilovači funguje tzv. termická kladná zpětná vazba, musíme se zvyšující se teplotou koncových tranzistorů snižovat předpětí na bázích, aby nedošlo ke zničení zesilovače. Termická z.v. je způsobena zvyšujícím se klidovým proudem při vzrůstu teploty, tento proud způsobí další nárůst teploty až do destrukce výkonových prvků.

Stabilizace se provádí pomocí termistoru, který je zapojen místo jednoho z odporů v děliči u tranzistoru, který řídí předpětí. Zajišťují-li nám předpětí diody, pak by měli být tepelně s chladičem (u křemíkových diod se napětí U_{ak} snižuje se vzrůstem teploty). Podobně jako diody lze použít i tranzistor, který řídí předpětí. Zde se využíváme teplotní změny napětí U_{be} . Pokud je tepelně svázaný s chladičem dokáže klidový proud udržet téměř konstantní. Dosti často se tyto tranzistory používají v pouzdru TO 126, které lze k chladiči přišroubovat.

1.4.4 Různá zapojení koncových tranzistorů

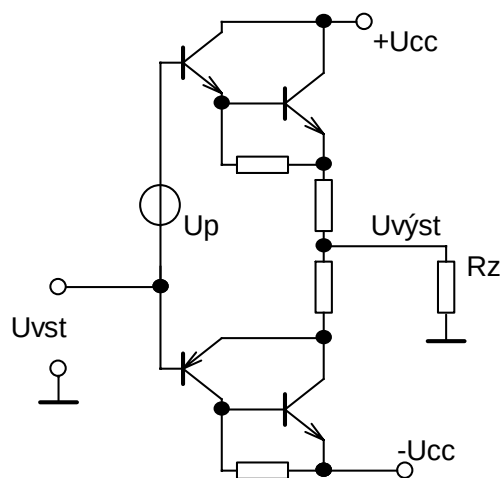
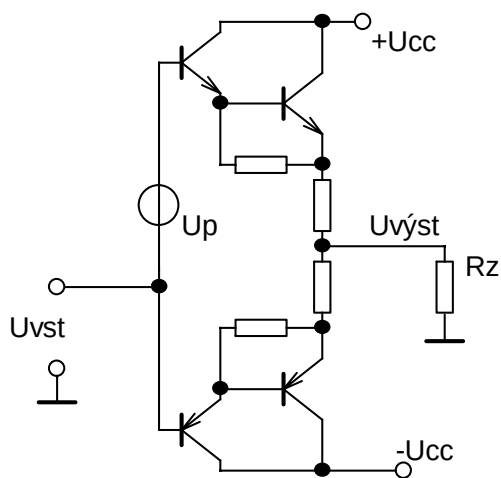
Dvojčinný koncový stupeň lze zapojit dle několika různých typů základních zapojení. Tranzistory lze zapojit se společným emitorem, nebo kolektorem.

Nejčastěji se používá zapojení se společným kolektorem, které zesiluje jen proudově. Proto je důležité, aby měl budič rozkmit napětí co největší (pokud možno téměř celého napájecího napětí, tzv. RAIL-TO-RAIL) a byl schopen dodat dostatečný proud. Výhoda tohoto zapojení spočívá, že mezi bázemi je pouze předpětí (nebo jsou spojeny pokud se jedná o třídu B) a lze je budit z jednoho budiče (jedním tranzistorem).

Zapojení se společným emitorem zesiluje napěťově i proudově, což je jeho největší výhoda. Jako nevýhoda je, že otáčí fázi a napětí mezi bázemi v dvojčinném zapojení je rovno téměř celému napájecímu napětí.

Tyto zapojení lze realizovat s dvojím typem tranzistorů a to s bipolárními a unipolárními, kde každý typ koncového stupně musí mít odlišné jak buzení tak regulaci klidového proudu.

Vlastní zapojení koncového stupně lze rozdělit dále na komplementární (Obr. 1.3 pro větší výkony použijeme s výhodou Darlingtnovo zapojení) a kvazikomplementární dvojici (Obr. 1.4).



Obr. 1.3 Komplementární Darlingtnova dvojice

Obr. 1.4 Kvazikomplementární zapojení

1.4.5 Komplementární dvojice

Komplementární dvojice jsou dva tranzistory shodných parametrů ale různého typu vodivosti (PNP a NPN). Tyto tranzistory pracují proti sobě a každý je buzen jinou polaritou vstupního signálu. Lze využít zapojení jak společným kolektorem (nejčastěji) a nebo ze společným emitorem. Zapojení je vhodné jen pro menší výkony.

1.4.6 Komplementární Darlingtnova dvojice

Výkonové koncové tranzistory mají nízký proudový zesilovací činitel. Budič musíme mít dimenzovaný tak, aby byl schopen dodat do bází koncových tranzistorů dostatečný proud. Tento proud se může blížit pro vysoké výkony až k jednotkám ampér. Jelikož budič pracuje v třídě A, měl by při tomto proudu velký ztrátový výkon a tudíž by musel být velmi dobře chlazený.

Proto se pro vyšší výkony používá komplementární Darlingtnova dvojice, která je nakreslena na Obr. 1.3. Ta má proudové zesílení řádově ve stovkách až tisících, tudíž budící stupeň nemusí mít tak velký stálý proud. Nevýhodou je vyšší předpětí, které musíme nastavit (cca 1,8V).

1.4.7 Kvazikomplementární zapojení

Jedná se prakticky o koncový stupeň typu PUSH-PUSH, který je buzen komplementární dvojicí. Tzn. oba tranzistory v koncovém stupni jsou stejné vodivosti (PNP, NPN) a jsou buzeny pomocí komplementární dvojice, která je daleko menšího výkonu. Koncové tranzistory zesilují pouze proud, který prochází předchozí komplementární dvojicí. Kvazikomplementární zapojení je zobrazeno na Obr. 1.4.

1.5 Další části zesilovače

1.5.1 Ochrana výstupních tranzistorů proti nadměrnému proudu

Vkládá se do samotného koncového stupně. Tento obvod snímá úbytek na emitorových (zapojení SC) odporech a při určitém napětí na těchto rezistorech omezí proud do báze koncového prvku, který na to reaguje snížením výstupního proudu do zátěže. Toto omezení ochrání koncové tranzistory před proudem, který by byl nad hranici SOAR a nedošlo k jeho průrazu. Chrání hlavně před připojením nedovoleně nízké impedance či při zkratu výstupu.

1.5.2 Předzesilovač

Je vstupní článek zesilovače jako celku. V tomto celku plní mnoho funkcí.

Jeho první funkcí je úrovněově přizpůsobit signál ze vstupu ku požadované velikosti signálu pro další stupeň zesilovače. Tento stupeň může být, jak korekční, tak samotný koncový zesilovač. Vstupní napětí do předzesilovače je většinou normované dle zdroje signálu (např. přehrávač CD má normováno $U_{\text{výst}} = 0,775\text{V}$), a proto při návrhu musíme počítat s jakým zdrojem signálu daný stupeň použijeme. Pro tzv. univerzální vstup používáme většinou zesilovač s nastavitelným zesílením, ten má ovládací prvek GAIN, kterým se nastavujeme vstupní citlivost.

Další důležitou činností je impedanční přizpůsobení. Každý zdroj má svou výstupní impedanci, každý zesilovač má určitou vstupní impedanci a tyto impedance se musí přizpůsobit tak aby každý další stupeň příliš nepřetěžoval předchozí. Vstupní impedance by měla být cca 10 krát vyšší, aby se ta výstupní příliš neuplatňovala.

Předzesilovač může mít i kmitočtovou korekci (např. RIAA), která uvádí signál, který byl změněn při výrobě záznamu zpět do původního stavu (nejlépe stejného jako původního).

Předzesilovač mívá velké zesílení, jelikož zesiluje nejmenší úroveň signálu (jedná-li se o signál nízkourovňový) je nejvíce citlivý na svůj vlastní šum, který zesiluje jak on sám tak i další stupně. Snažíme se tedy o co největší možný odstup signál-šum, abychom potlačili šum i brum. Předzesilovač musí být možnost relativně velkého přebuzení, aby pokud možno limitace vznikala pouze v koncovém zesilovači a ne v předzesilovačích, aby koncový stupeň nezesiloval obdélníky.

1.5.3 Korekční zesilovač a ekvalizér

Slouží k zvýraznění nebo potlačení určité frekvenční oblasti signálu tak, aby výsledný zvuk více vyhovoval posluchači. Mnohopásmovým equalizérem lze také vykorigovat frekvenční nedostatky reprosoustav nebo akustického prostoru (např. při ozvučování sálu).

Korekčním zesilovačem lze korigovat nízké a vysoké frekvence přičemž zesílení (útlum) na středních kmitočtech je dán pevně (v některých případech je jednotkový). Je-li zařízení stereofonní, pak se většinou korigují oba kanály současně.

Chceme-li rozdělit pásmo na více částí a korigovat jednotlivá pásma nezávisle, nazýváme toto zařízení ekvalizér. Tyto zařízení mohou mít téměř libovolný počet dělicích frekvencí (ve studiích se lze setkat i s 36 pásmovými) a ve většině případů se vyrábí v provedení, že každý kanál lze korigovat zvlášť.

Ke korekcím patří i možnost úpravy šíře stereobáze, fyziologická regulace hlasitosti tzv. loudness (měl by se přibližovat tzv. Fletcher-Munsonovým křivkám stejné hlasitosti) a balance, kterou si může posluchač nastavit stejnou hlasitost z obou reproduktorů aniž by seděl přesně uprostřed.

1.5.4 Další obvody nejen ochran

Mezi další obvody používané v zesilovačích patří různé indikátory vybuzení, výstupního signálu, clip detektory, softstart, a ochrany reproduktorů.

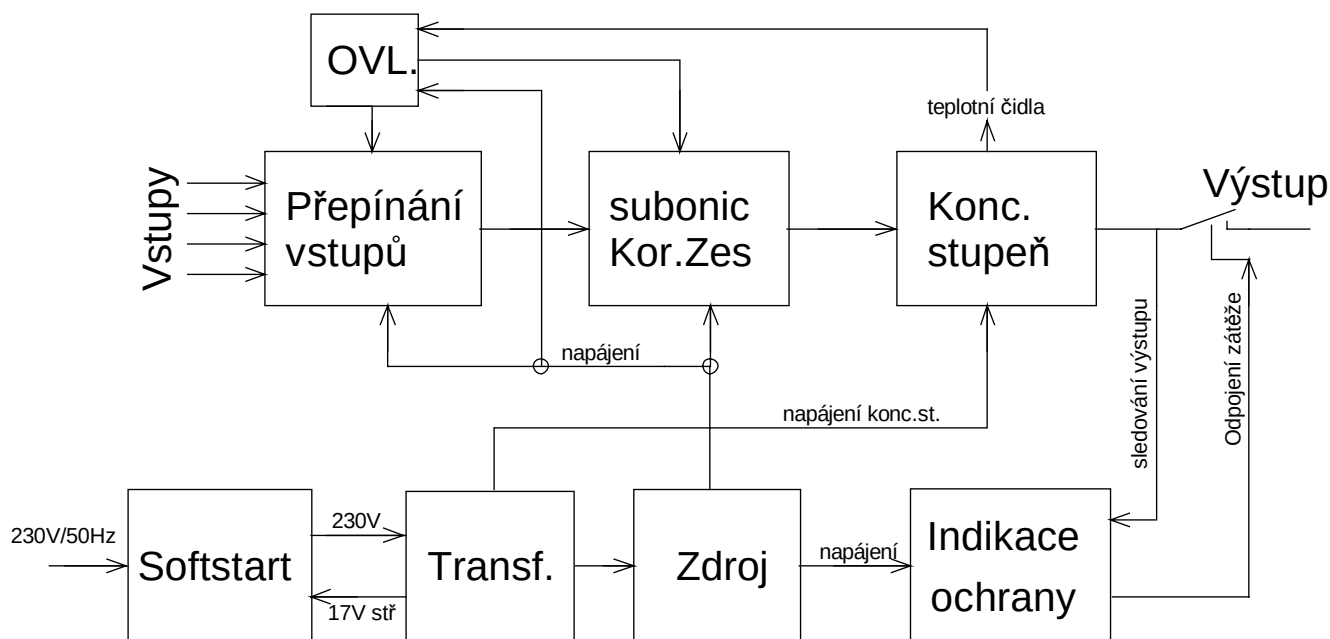
Indikátory slouží ve většině domácích zařízení pro „parádu“. Indikátor vybuzení nám příliš nevypoví není-li přesně cejchován. Je-li přesný dá se díky němu poznat přebuzení vstupních obvodů, což má dopad nejen na kvalitu zvuku vycházejícího ze soustavy, ale ničí se koncový zesilovač a připojené reproduktory. Indikátor výstupního výkonu nám může říci více a to zejména chceme-li hrát téměř na plný výkon. Ve většině případů však postačí clip detektor, který detekuje, že se zesilovač blíží k limitaci (nebo v ní je). Limitace není dobrá jak pro zesilovač, tak hlavně pro připojené reproduktory, jelikož limitací vznikají složky, které obsahují vyšší harmonické složky, které přetíží (zničí) výškový reproduktor.

Softstart je určen pro zesilovače vyššího výkonu, kde nárazový proud po zapnutí transformátoru má velikost desítek ampér a vyhazuje jističe. Toto zařízení snižuje první náraz proudu (např. pomocí rezistoru v sérii s transformátorem), a po určité době tento rezistor přemostí (např. pomocí relé) a obvod pracuje v obvyklém režimu.

Ochranou reproduktorů se rozumí ochrana před stejnosměrným proudem na výstupu zesilovače. Obvod tedy sleduje výstupní napětí, objeví-li se na něm stejnosměrná složka (např. po proražení koncového tranzistoru), reproduktory odpojí a tím zabrání jejich zničení. Tento obvod by měl obsahovat i opožděné připojení zátěže po zapnutí, aby se předešlo lupancům než se ustálí přechodové děje v zesilovači.

2 Vlastní elektronické řešení zesilovače

2.1 Blokové schéma navrhovaného řešení



Obr. 2.1 Blokové schéma navrhovaného výkonového zesilovače

Legenda:

OVL.	mikroprocesorové ovládání přepínače vstupů, korekcí a ochran
230V/50Hz	napájecí napětí ze sítového rozvodu domu
Vstupy	jednotlivé vstupy zesilovače, počítáno s linkovou úrovní $U_{vst} = 0,775V$
Přepínání vstupů	dle ovládacího signálu vybere zadaný vstup
Subsonic, Kor.zes	subsonic – ořezává nízké frekvence korekční předzesilovač – upravuje nízké a vysoké kmitočty signálu
Konc. stupeň	výkonově zesiluje akustický signál, obsahuje vlastní zdroj
Softstart	zajišťuje plynulý náběh zdroje
Transf.	transformuje síťové napětí pro napájení konc.stupně a pro zdroj
Zdroj	usměrňuje a stabilizuje napětí pro modul ochran, přepínání vstupů a subsonic s korekčním předzesilovačem
Indikace, ochrany	indikuje limitaci a chrání připojenou zátěž před ss napětím na výstupu konc. stupně

2.2 Předmluva k navrhovanému řešení

Popis jednotlivých celků obsahuje simulované schéma, stručný popis a výsledky simulací. Dále jsou uvedena schémata jednotlivých celků, z nich vytvořené DPS s osazovacím výkresem. U bloků, které jsou simulované je záměrně vloženo jak schéma simulační, tak schéma, ze kterého se vytvářela DPS. Důvodem je odlišné číslování a vypuštění některých součástí. Simulační schémata neobsahují např. blokové kondenzátory napájení a některé další věci, které jsou nutné po konstrukční stránce.

Simulační schéma korekčního stupně neobsahuje výstupní část s ovládáním hlasitosti a balance, protože jsem chtěl simulovat pouze korekční zesilovač a subsonický filtr. Přidáním těchto částí by se na výsledku simulace pouze snížila maximální frekvence ve frekvenční charakteristice. Toto snížení je způsobeno kompenzací vysokých kmitočtů v posledním stupni.

Koncový stupeň má v konečném schématu na desce usměrňovač, filtrační kondenzátory a pojistky, aby nemusel mít zvláštní napájecí zdroj. Usměrněné napájecí napětí je před pojistkami vyvedeno na konektory, ze kterých ho lze odebírat, např. pro napájení clip detektoru.

Desky korekčního předzesilovače a ochran jsou zdvojeny a proto pro stereofonní zesilovač stačí jen jedna deska. Tyto desky neobsahují napájení, které je umístěno na zvláštním modulu. Modul napájení jsem zvolil samostatný, protože napájecí napětí $\pm 18V$ stabilizovaných, 24V a 9V jsou univerzální pro více modulů. V případě, že bych chtěl dodatečně přidat další moduly, bude rozvod napájení lehce realizovatelný.

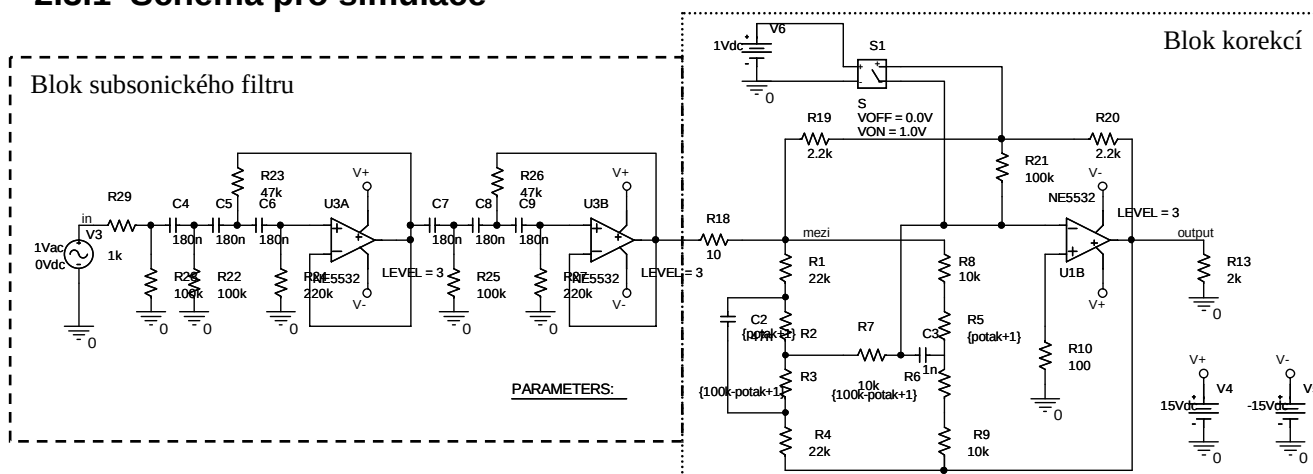
Odlišnost schémat je také způsobena tím, že simulační program neobsahoval všechny potřebné součástky, které jsem musel buď nahradit (např. optočlen s rezistorem jsem nahradil spínačem), nebo zcela vynechat.

Vlastní simulace je bohužel omezená některými podmínkami, a tak se mi například nepodařilo nasimulovat u ochranného obvodu do jaké frekvence reaguje, protože AC analýza se na toto nedá použít a časová parametrická analýza s proměnou frekvencí (jako parametr) o tom bohužel nevypovídá dostatečně, protože je zde bráno v potaz i např. nabíjení kondenzátoru. U koncového stupně se mi nepodařilo nasimulovat harmonické a intermodulační zkreslení, protože se mi nepodařilo zjistit jakým způsobem to lze udělat.

U některých schémat nebylo co simulovat, protože jsou to jednoduché bloky sloužící k řízení, napájení, nebo pouze přepínání signálu, nejsou simulace ani simulační schémata uvedena.

2.3 Korekční předzesilovač

2.3.1 Schéma pro simulace



Obr. 2.2 Schéma subsonického filtru svázaného s korekčním zesilovačem.

2.3.2 Popis a zapojení

Zapojení korekčního zesilovače je složeno ze dvou funkčních bloků.

Blok subsonického filtru má funkci potlačení frekvenčních pásem pod cca 15Hz, které již neslyšíme a škodí připojeným reproduktorům i zesilovači. Jedná se o dva bloky Butterworthových filtrů typu horní propust. Oba filtry mají jednotkové zesílení a strmost 18dB/okt, a mezní frekvenci 15,1Hz, dohromady mají tedy strmost 36dB/okt, což je cca 120dB/dek. Vstupní impedance by měla být co nejnižší, a proto by bylo vhodné ještě doplnit nějaký přizpůsobovací člen nebo zajistit zdroj s malým výstupním odporem. Parametru 120dB/dek tento filtr nedosahuje ani v simulacích, ale strmost je pro tyto účely postačující.

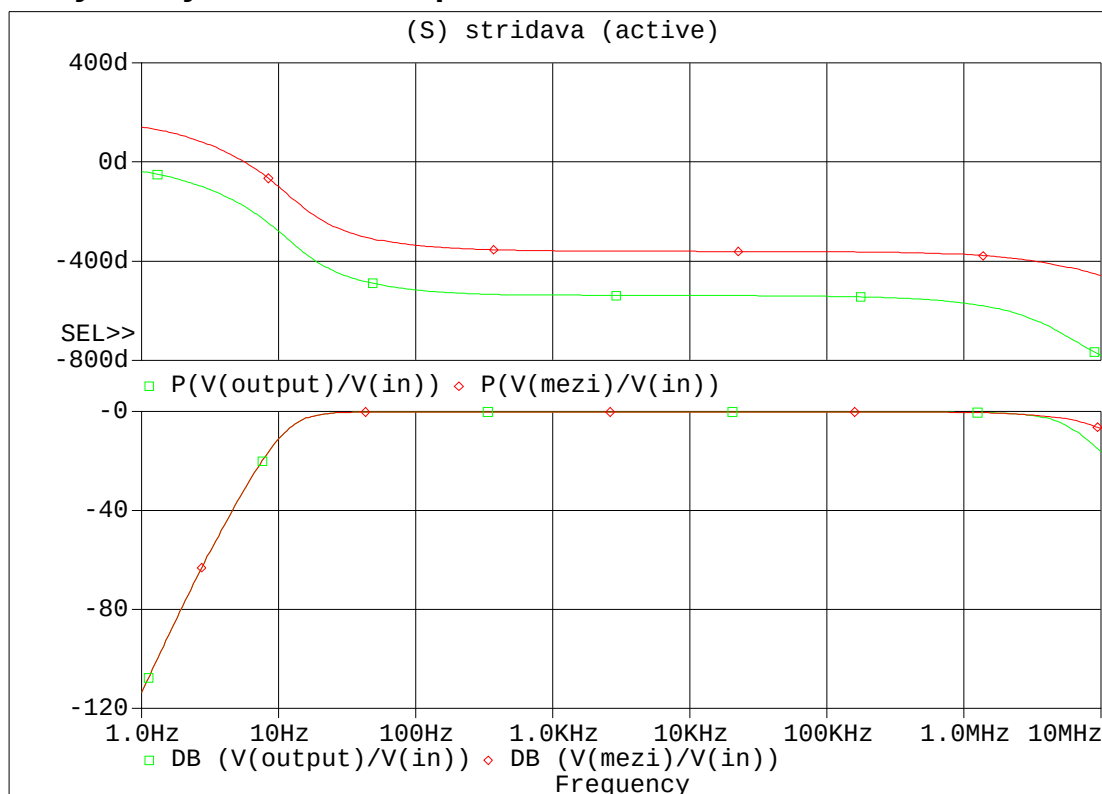
Na výstup druhého členu subsonického filtru je připojen Baxandallův korektor hloubek a výšek, který je zapojen ve zpětné vazbě OZ. Při středové úrovni potenciometrů je zesílení tohoto stupně rovno nule a jeho přenosová a fázová charakteristika je zobrazena na Obr. 2.3. Korekce na vysokých a nízkých kmitočtech dosahují v krajních polohách řídicího prvku zisku až $\pm 10\text{dB}$, což lze do určité míry regulovat rezistorem R21. Tento zisk lze sepnutím spínače S1 (bude realizován optoelektronickou součástkou LED-fotoodpor) snížit na $\pm 1.8\text{dB}$ pro vysoké frekvence, na nízkých je poté zisk cca $\pm 0.5\text{dB}$.

Za těmito dvěma bloky je na DPS zapojen ještě obvod balancí, regulátoru hlasitosti, umlčovacího obvodu a zesilovače s pevným zesílením asi 3krát. Obvod balancí a regulátoru hlasitosti je řešen pouze připojením potenciometrů přes ochranné rezistory do signálové cesty a neobsahuje loudness korekci. Umlčovací obvod je řešen optočlenem (stejným jako vypínání korekcí), který je připojen k běžci potenciometru ovládajícího hlasitost. Po aktivaci obvodu zkratuje optočlen signál na zem, protože má velmi malý vnitřní odpor.

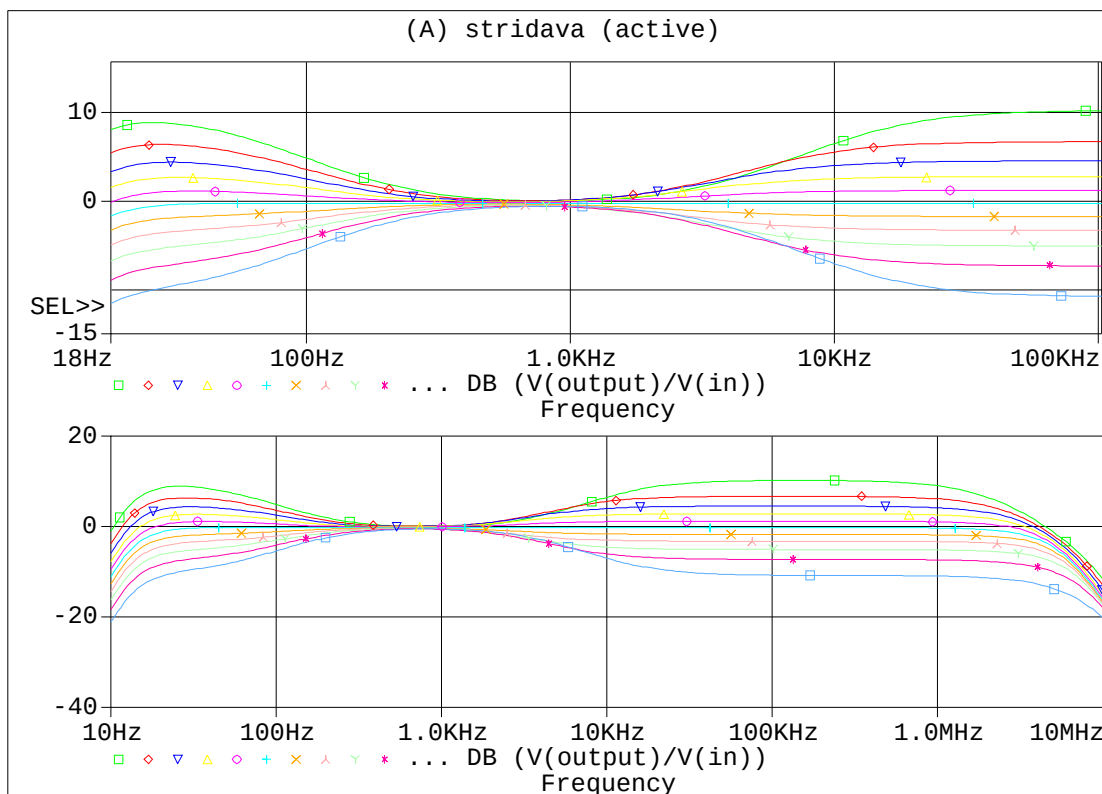
Vypínání korekcí a ovládání umlčovacího obvodu je ovládáno externě přes mikroprocesor.

Obě tyto zapojení jsem převzal z [13] a svázal s mírnými úpravami, nebo přidáním některých prvků pro potřebu mého zapojení.

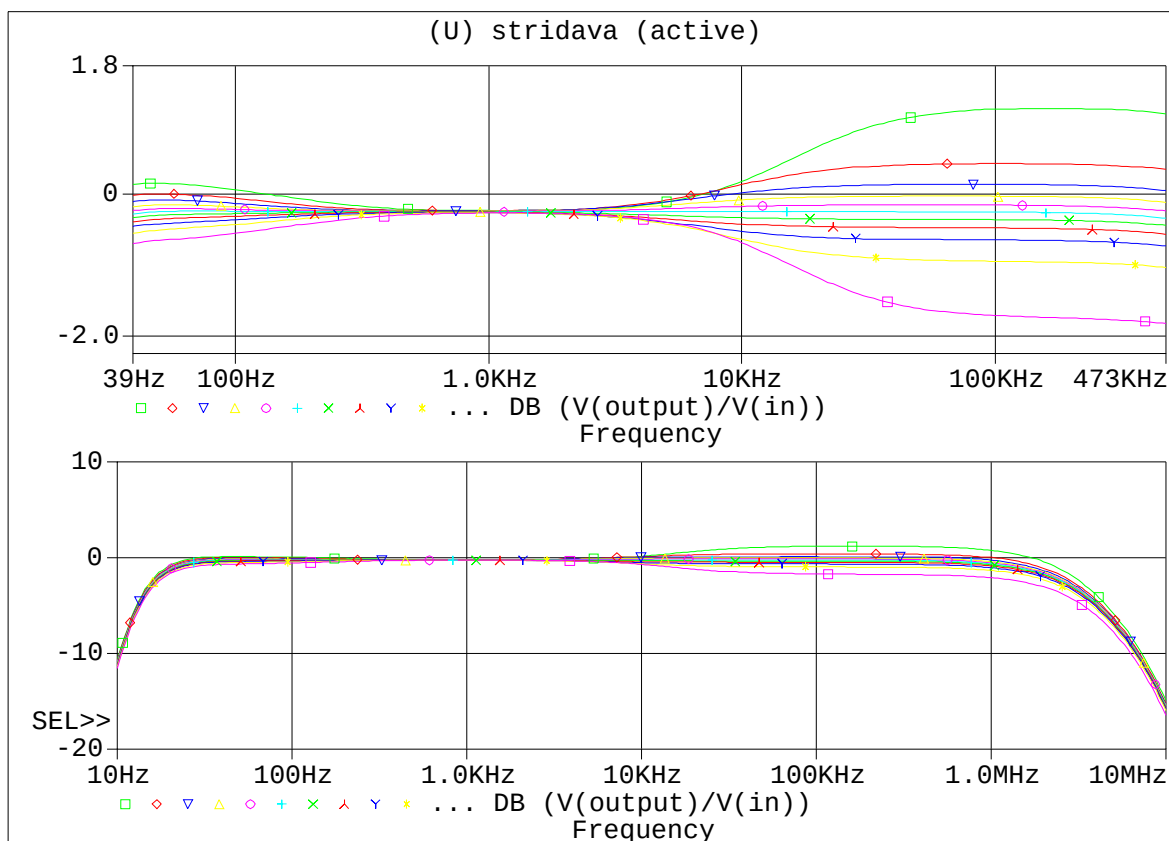
2.3.3 Výsledky simulací v PSpice



Obr. 2.3 Přenosová a fázová charakteristika korekčního předzesilovače (parametr = 50k Ω)



Obr. 2.4 Korekční charakteristika předzesilovače (normální režim)

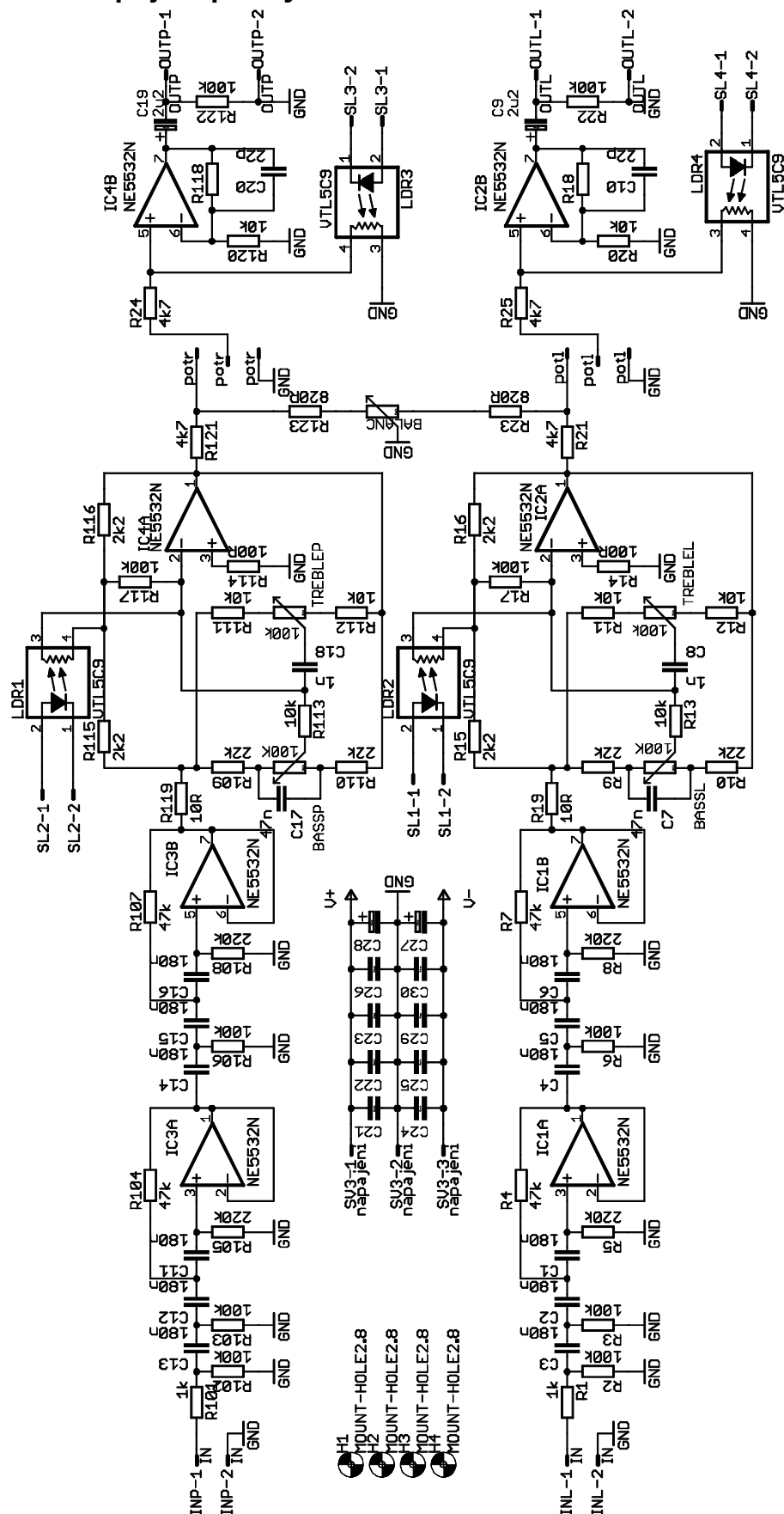


Obr. 2.5 Korekční charakteristika předzesilovače (režim potlačení korekcí)

Pozn.:

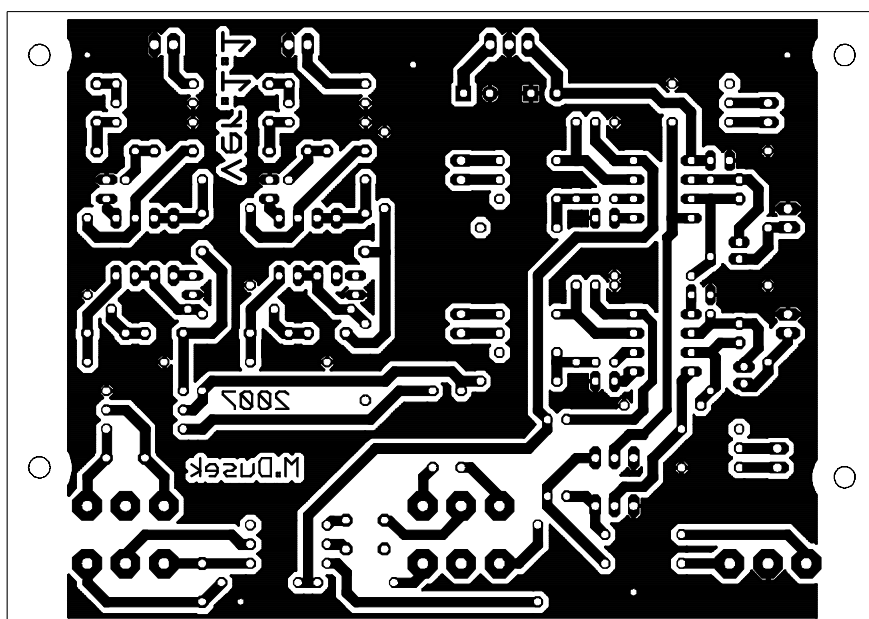
- Charakteristiky jsou pro zatěžovací impedanci $2k\Omega$, změna této impedance se projeví především prodloužením kmitočtového pásma směrem nahoru.
- Rozsahy parametrické analýzy jsou volené od 0Ω do $100k\Omega$ s krokem po $10k\Omega$.

2.3.4 Schéma zapojení pro výrobu DPS

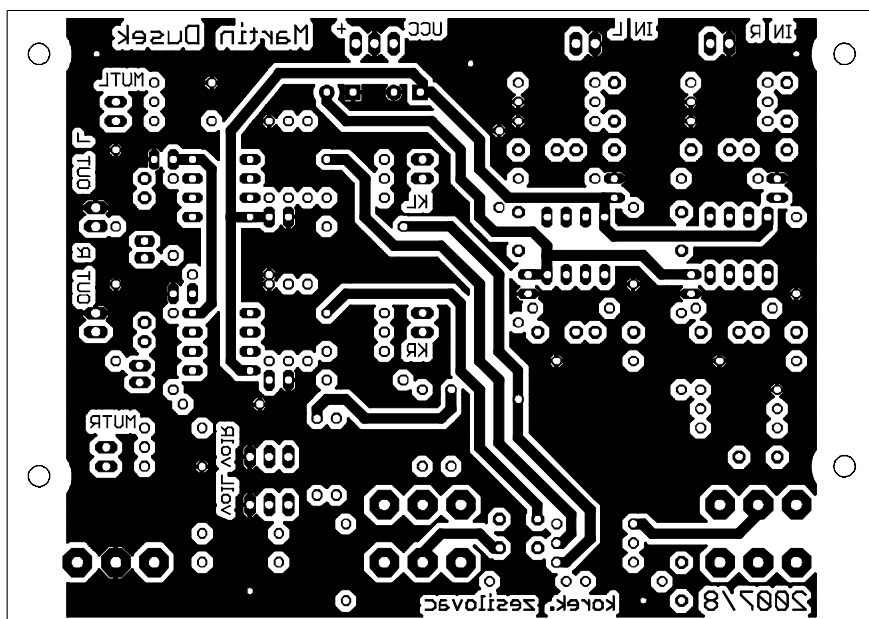


Obr. 2.6 Schéma zapojení na desce korekčního zesilovače

2.3.5 Deska plošných spojů

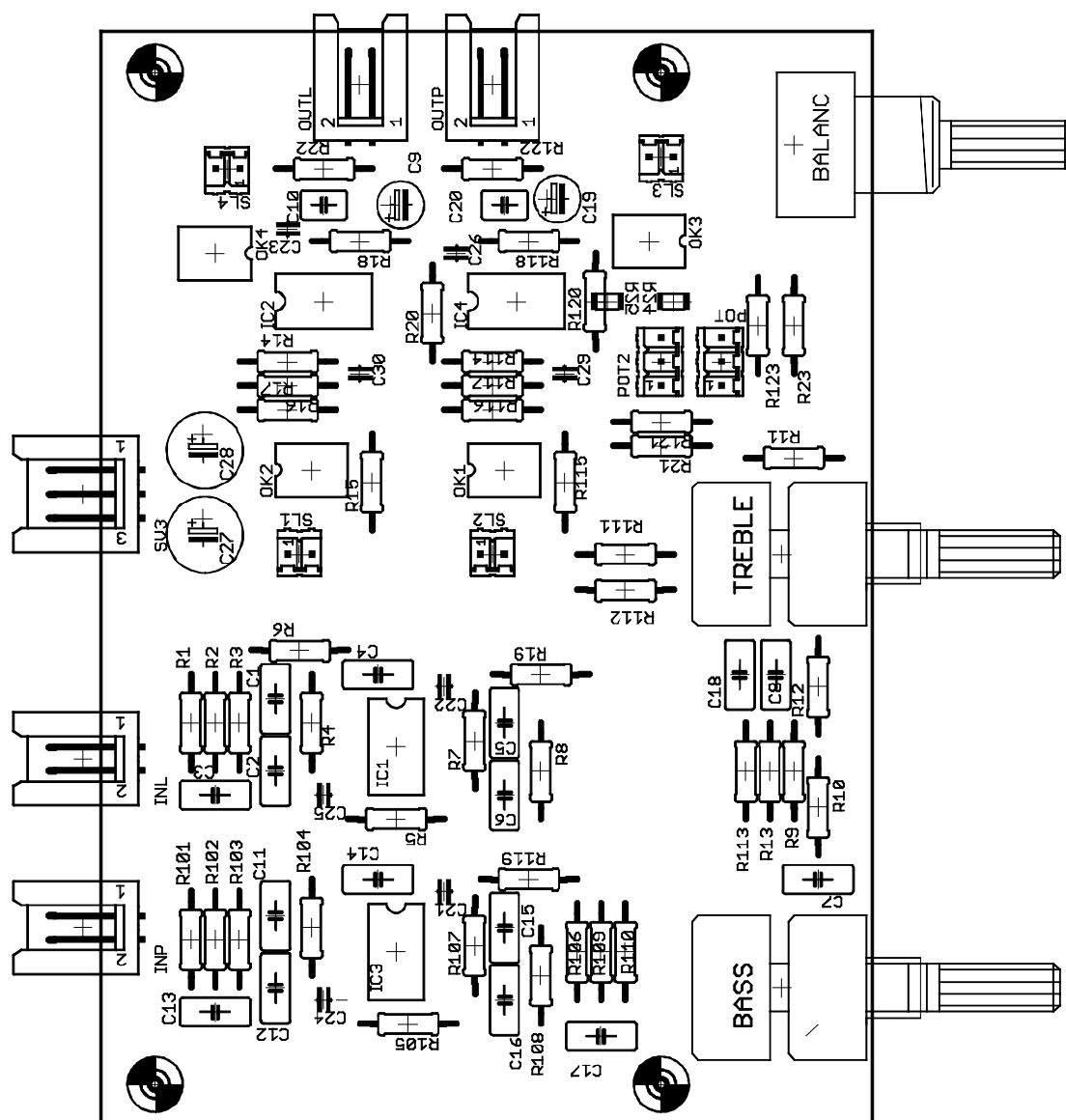


Obr. 2.7 Spodní strana desky korekčního zesilovače



Obr. 2.8 Vrchní strana desky korekčního zesilovače

2.3.6 Osazovací výkres



Obr. 2.9 Osazovací výkres desky korekčního zesilovače

2.3.7 Seznam součástek

Název	Hodnota	Součástka	Počet
SL1, SL2, SL3, SL4	Konektor se zámkem	M02S	4
R1, R101	1k	R-EU_0207/10	2
R21, R121	1k2	R-EU_0207/10	2
C8, C18	1n	C5/3	2
R15, R16, R115, R116	2k2	R-EU_0207/10	4
C9, C19	2u2	C-EL_2	2
R19, R119	10R	R-EU_0207/10	2
R11, R12, R13, R20, R111, R112, R113, R120	10k	R-EU_0207/10	8
R9, R10, R109, R110	22k	R-EU_0207/10	4
C10, C20	22p	C2,5-3	2
R18, R118	33k	R-EU_0207/10	2
R4, R7, R104, R107	47k	R-EU_0207/10	4
C7, C17	47n	C5/3	2
BALANC	50k/N	TP 160	1
BASS, TREBLE	100k/N	TP 169	2
R14, R114	100R	R-EU_0207/10	2
R2, R3, R6, R17, R22, R102, R103, R106, R117, R122	100k	R-EU_0207/10	10
C21, C22, C23, C24, C25, C26, C29, C30	100n	C-2,5	8
C27, C28	100u	C-EL_3,5	2
C1, C2, C3, C4, C5, C6, C11, C12, C13, C14, C15, C16	180n	C5/3	12
R5, R8, R105, R108	220k	R-EU_0207/10	4
R23, R123	820R	R-EU_0207/10	2
OK1, OK2, OK3, OK4	H11F1	H11F1	4
INL, INP	Konektor se zámkem	L02P	2
IC1, IC2, IC3, IC4	NE5532N	NE5532N	4
OUTL, OUTP	Konektor se zámkem	L02P	2
POT2, POT	Konektor se zámkem	M03S	2

Tab. 1 Seznam součástek korekčního předzesilovače vygenerovaný v programu Eagle

2.4 Koncový stupeň zesilovače

2.4.1 Průběžný vývoj

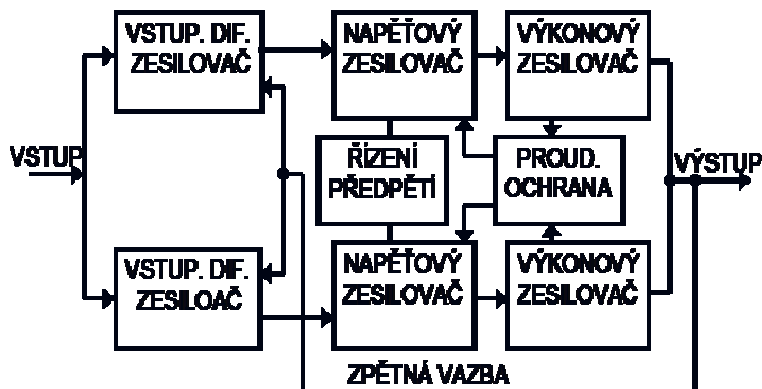
Původní koncept jak byl prezentován v předchozí práci byl celosymetrický. Tento koncept se v simulacích choval velmi dobře a ani v případě přebuzení obdélníkem o frekvenci 100kHz nezakmitával. Po osazení desky se nechoval tak stabilně jako v simulacích a v limitaci oscilloval. Po nastudování další literatury a překompenzování zesilovače se již choval stabilně, ale rychlost přeběhu nebyla dle mého názoru dostatečná a zesilovač měl problém s výstupním ofsetem a nestálým proudem ve VAS.

I přes mnoho výhod celosymetrické koncepce jsem se rozhodl vypustit jednu polovinu vstupní části a kladnou část VAS nahradit proudovým zdrojem. Protože takto sestavený zesilovač byl o dost stabilnější mohl jsem vynechat jeden kompenzační kondenzátor a tudíž stoupla rychlost celého zesilovače. Další problém byl s výstupním ofsetem. Ten byl způsoben tím, že pro proud vstupní části 3mA tekla do bází proud cca 10 μ A. Tento proud vyvolává na rezistoru R₂ (osazovací výkres) úbytek 460mV, který se přenesl v hodnotě 380mV na výstup. Problém jsem vyřešil zdrojem proudu o opačné polaritě, který tento proud na vstupu kompenzuje.

Deska je navržena pro celosymetrické zapojení lze tudíž využít obou variant zapojení.

2.4.2 Popis zapojení celosymetrické verze

Zesilovač na Obr. 2.11 je v celosymetrickém zapojení, tzn. že kladnou půlvlnu vstupního signálu zpracovává jedna část zapojení a zápornou půlvlnu část druhá. Zesilovač lze blokově rozdělit na části: vstupní část, VAS a výkonovou část, řízení předpětí a proudovou ochranu. Uspořádání tohoto rozdělení je vidět na Obr. 2.10.



Obr. 2.10 Blokové uspořádání celosymetrického zapojení koncového stupně

Vstupní signál nejprve projde pásmovou propustí, která od něho oddělí stejnosměrnou složku s velmi nízkými kmitočty a vysoké frekvence, např. blízkého AM vysílače, které by se po demodulování ve vstupním zesilovači mohly mísit s vlastním signálem a tím ho rušit, nebo by se mohli zesílit a poškodit výškové reproduktory. Dále signál putuje do tranzistorů Q1 a Q3, které jsou součástí dvou diferenčních zesilovačů, každý pro jednu polovinu zesilovače. Diferenční zesilovače tvořené Q1,Q2 a Q3,Q4, jsou napájené ze zdrojů proudu Q9, Q10 proudem cca 4mA. Tranzistory Q5,Q6 a v druhé části Q7,Q8 tvoří proudové zrcadlo. To zajišťuje, aby proud tekoucí kolektory diferenčních stupňů byl vždy stejný, rovný polovině celkového. Tyto dvě věci zajišťují aktivní zátěž a tím i daleko lepší vlastnosti těchto stupňů a jejich vlastní velké proudové zesílení. Emitterové odpory připojené k tranzistorům Q1, Q2, Q3, Q4 by měli mít úbytek napětí cca 60 – 100 mV a dle [7] by měly zlepšit linearitu a SR vstupní části, protože případná nelinearita by se zesilovala

v dalších stupních. Emitorové odpory připojené k tranzistorům Q5, Q6, Q7, Q8 mají za úkol zlepšit chování proudových zrcadel, při měnícím se vstupním (napájecím) napětí.

Z kolektorů Q1 a Q3 je signál přiveden do části nazvané VAS. V této části dochází k největšímu napětěvému zesílení v celém zesilovači. Tato část je zapojená do kaskódy, kterou tvoří Q15, Q35 a Q16, Q33 v druhé půlce. Tranzistory Q15 a Q16 mají velmi velký rozkmit napětí, a proto je vhodné, aby byli pokud možno co nejrychlejší. Jejich rychlost ovlivňuje SR a stabilitu koncového stupně, proto jsem na tuto pozici zvolil videotranzistory 2SB649 (PNP) a 2SD669 (NPN) s $F_T = 140\text{MHz}$. Daly by se použít i rychlejší typy, ale tyto typy mají většinou nízké napětí U_{cemax} , nebo nejsou snadno dostupné. Tranzistory Q32, Q33 slouží jako ochrana před nadměrným proudem tekoucím do výkonové části. Tento proud se zvýší nad povolenou mez pouze při hlubokém přebuzení a nebo nasazením proudové ochrany.

Mezi kolektory VAS je zapojen obvod pro zajištění předpětí, které vytváří požadovanou třídu AB tohoto koncového stupně. Tento obvod je tvořen tranzistorem Q19, který se chová jako zdroj regulovaného konstantního napětí, jehož velikost je odvozena od napětí na děliči, který je připojen na bázi tohoto tranzistoru. Mezi přechodem C-E Q19 jsou zapojeny diody D5 až D8, které jsou součástí koncových tranzistorů. Napětí U_{ak} se v určitých mezích mění podle teploty na čipech tranzistorů. Na přechodu B-E Q19 je zapojen trimr, kterým se nastavuje klidový proud (velikostí předpětí).

Z VAS je signál přiveden na tranzistory Q18, Q22, Q24, Q26, Q28 v kladné větvi a v záporné na Q19, Q23, Q25, Q27, Q29. Tyto tranzistory jsou všechny zapojené se společným kolektorem. Toto zapojení umožňuje velké proudové zesílení, avšak napětěvé zesílení je menší než jedna. Výstupní napětí tedy sleduje napětí VAS části. Emitorové rezistory R26, R27, R28, R29, R30, R31 slouží k srovnání rozdílu zesílení (rozdíl β) jednotlivých výkonových koncových tranzistorů Q24, Q25, Q26, Q27, Q28 a Q29. Na vyrovnaní proudu jednotlivými koncovými tranzistory se podílí i rezistory připojené na jejich báze. Kondenzátor C49 připojený paralelně k rezistoru R49, se podílí na rychlejší uzavírání předbudičů a zvyšuje maximální frekvenci, na které dochází k příčnému proudu, který je pro koncové tranzistory velmi nebezpečný.

Rezistory R26 a R28 jsou navíc součástí nadproudové ochrany. Úbytek na těchto rezistorech se přes další prvky (R43, R42, D19, D22, R41, R39), které ho dle amplitudy zmenší, dostane na báze tranzistorů Q30 a Q31. Ty se při dostatečně velkém napětí otevrou, čímž se aktivuje ochrana a proud z VAS se uzavře přes tyto tranzistory. Tímto se sníží vstupní proud, který koncový stupeň zesiluje a tranzistory sníží výstupní proud. Toto zabrání překročení maximálních dovolených proudů, které by je mohli vést k destrukci polovodičového osazení. Diody D32, D33 a rezistory R74, R73 slouží k nabití kondenzátorů C28 a C29, které by v prvních periodách překročení maximálního proudu, zabránily v dobré funkci ochrany.

Z uzlu, ve kterém jsou spojeny rezistory R26, R27, R28, R29, R30 a R31 signál pokračuje do výstupní tlumivky, Boucherotova členu, modulu ochrany a na výstupní svorky. Z tohoto uzlu jde signál také do obvodu celkové zpětné vazby, která řídí výsledné napětěvé zesílení celého zesilovače. Zesílení určuje poměr rezistorů R52 a R24. Diody D23 a D24 slouží jako ochrana proti naindukovanému napětí v připojeném zařízení (např. cívkám ve složitějších vyhybkách), nebo při přepřelování zesilovače.

Jelikož by zapojení nebylo ve všech případech vstupního signálu stabilní, je doplněno o prvky, které pomohou tuto stabilitu zajistit. Tyto prvky jsou přidány do rozkmitové části. Kondenzátory C62 a C65 snižují zesílení na vysokých kmitočtech, na kterých právě dochází k zákmitům. Kompenzace jsou zaneseny i ve zpětné vazbě prvkem C66. Vstupní diferenční zesilovač je kompenzován RC členem R78, C61 a R77, C60, který sníží jeho zesílení na vysokých kmitočtech. Další nedílnou částí jsou Boucherotovy členy, které též chrání zesilovač před rozkmitáním.

Schéma vstupní části bylo přebráno (s úpravou proudu) z [7]. VAS část byla převzata z [6] a upravena dle [11] o antisaturační diody. Koncový stupeň a řízení proudu byl přebrán ze zesilovače LEACH AMP z [14] a [4]. Proudová ochrana byla převzata se zapojení DPA440 dle [11], obvod pro zlepšení funkce byl nalezen na fóru <http://hifi.slovanet.sk>.

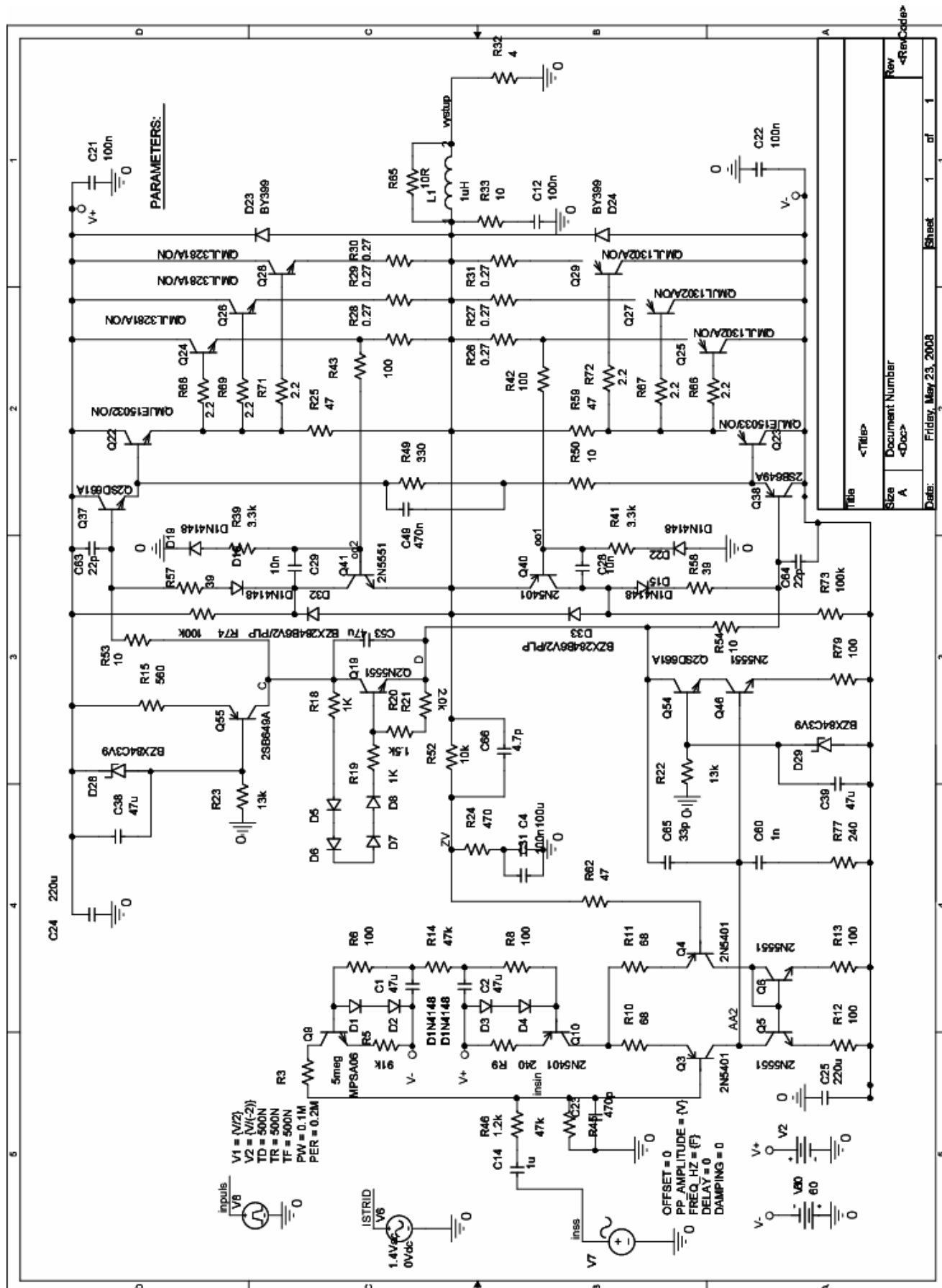
2.4.3 Popis zapojení a úprav nesymetrické verze koncového stupně

Funkce jednotlivých bloků je totožná s minulým zapojením, avšak VAS část je buzena pouze jedním diferenčním zesilovačem. Tento zesilovač budí zápornou větev VAS. V kladné větvi byl výměnou tranzistoru Q12 za rezistor R15 vytvořen zdroj proudu, který napájí zápornou větev proudem cca 6mA. Jelikož obvodem řízení klidového proudu teče konstantní proud, odstranil se již problém s jeho udržením, který nastal u nesymetrické verze.

Protože takto postavený zesilovač byl stabilní, rozhodl jsem se snížit kompenzaci kaskódy VAS. Toto snížení zvýšilo 3krát rychlost přeběhu, aniž by byl zesilovač nestabilní. Problém s výstupním ofsetem jsem vyřešil využitím druhého zdroje proudu, jehož výstupní proud jsem snížil na požadovaných $6,5\mu\text{A}$ a přivedl na vstup. Snížil jsem též proud diferenčním stupněm, z 4mA na 2,5mA a musel tudíž upravit velikost rezistorů R10, R11, R12, R13. Upravení proběhlo dle doporučení (graf) v [6].

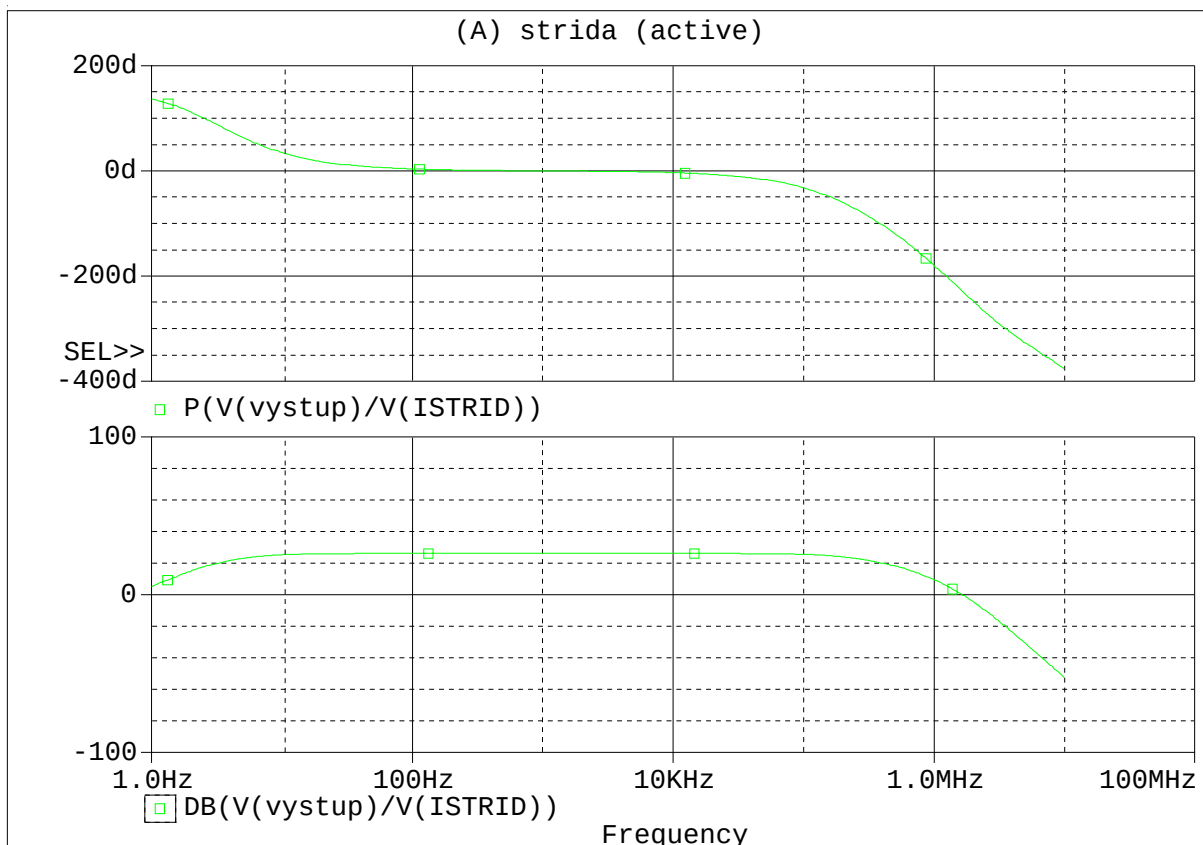
- 27 -

2.4.5 Nesymetrické zapojení koncového stupně

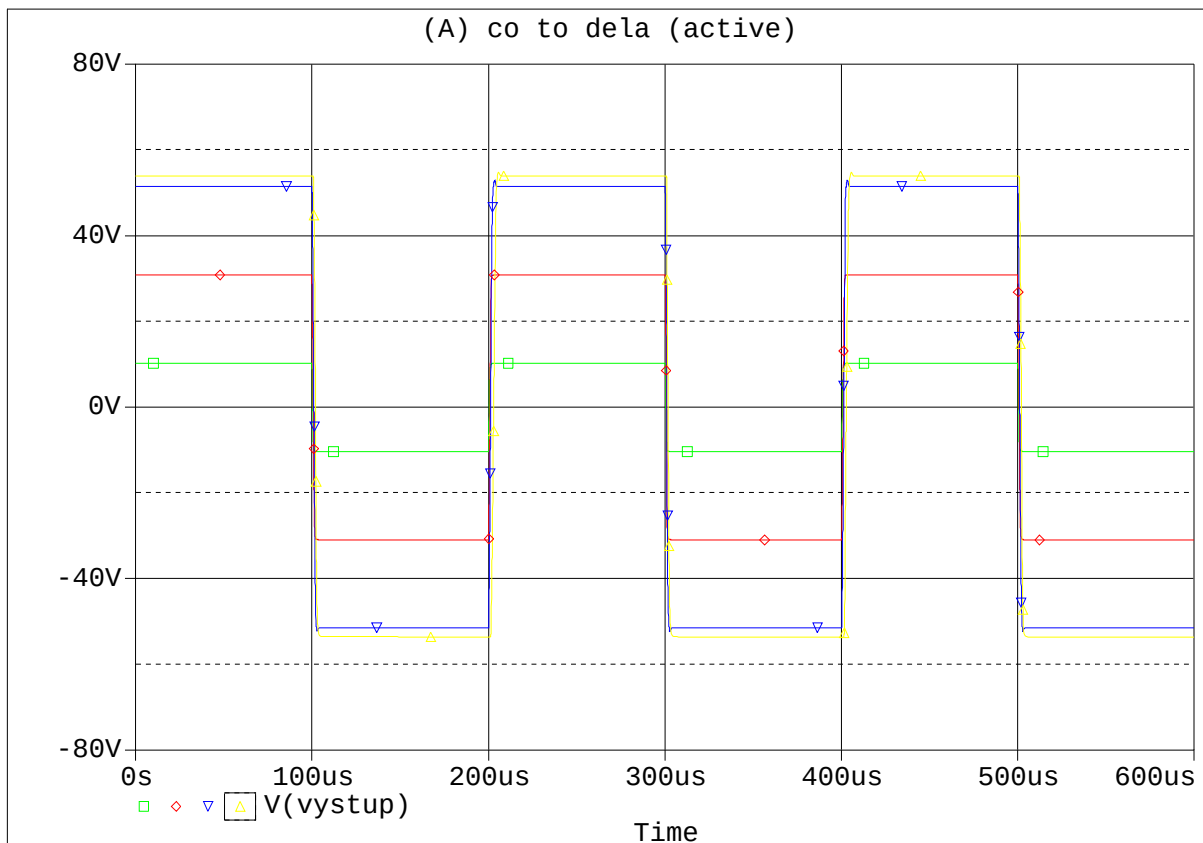


Obr. 2.12 Schéma nesymetrického zapojení koncového stupně pro simulace v PSpice

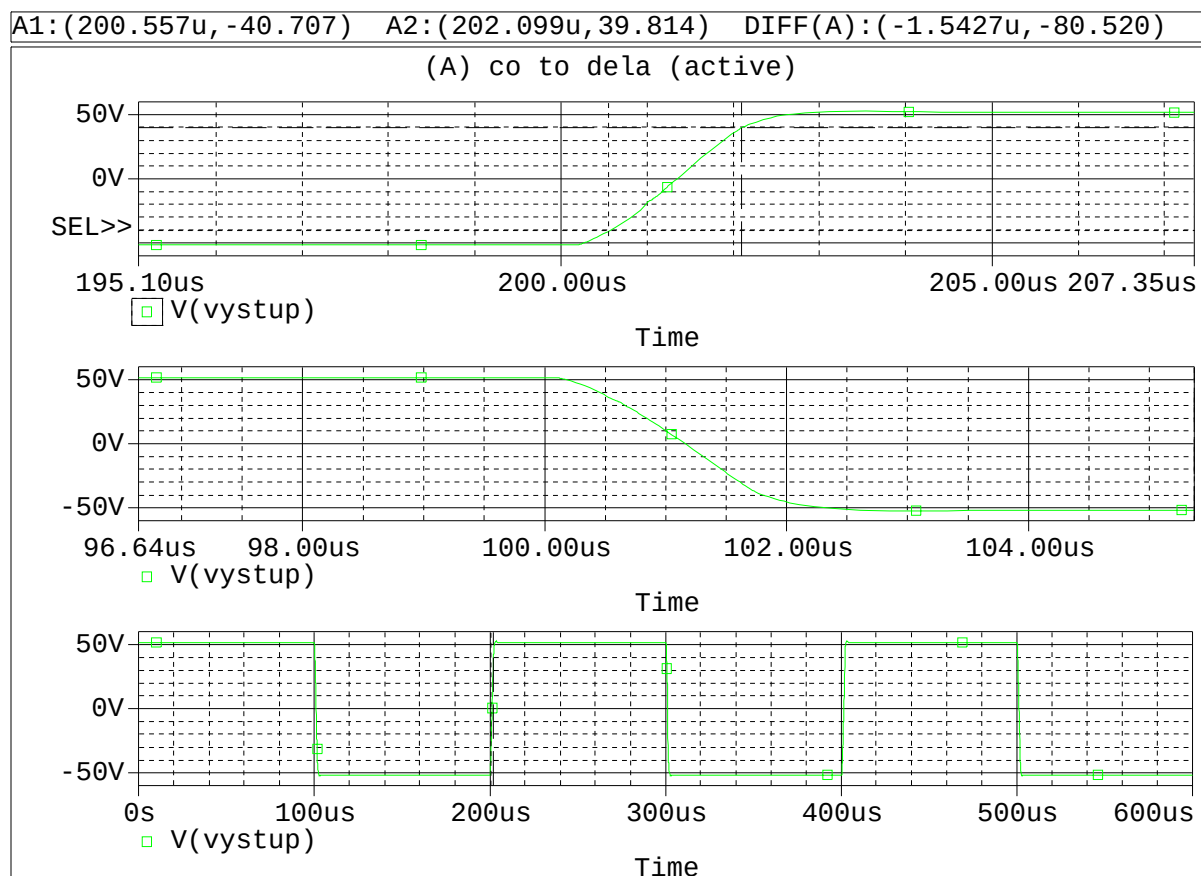
2.4.6 Výsledky simulací v PSpice



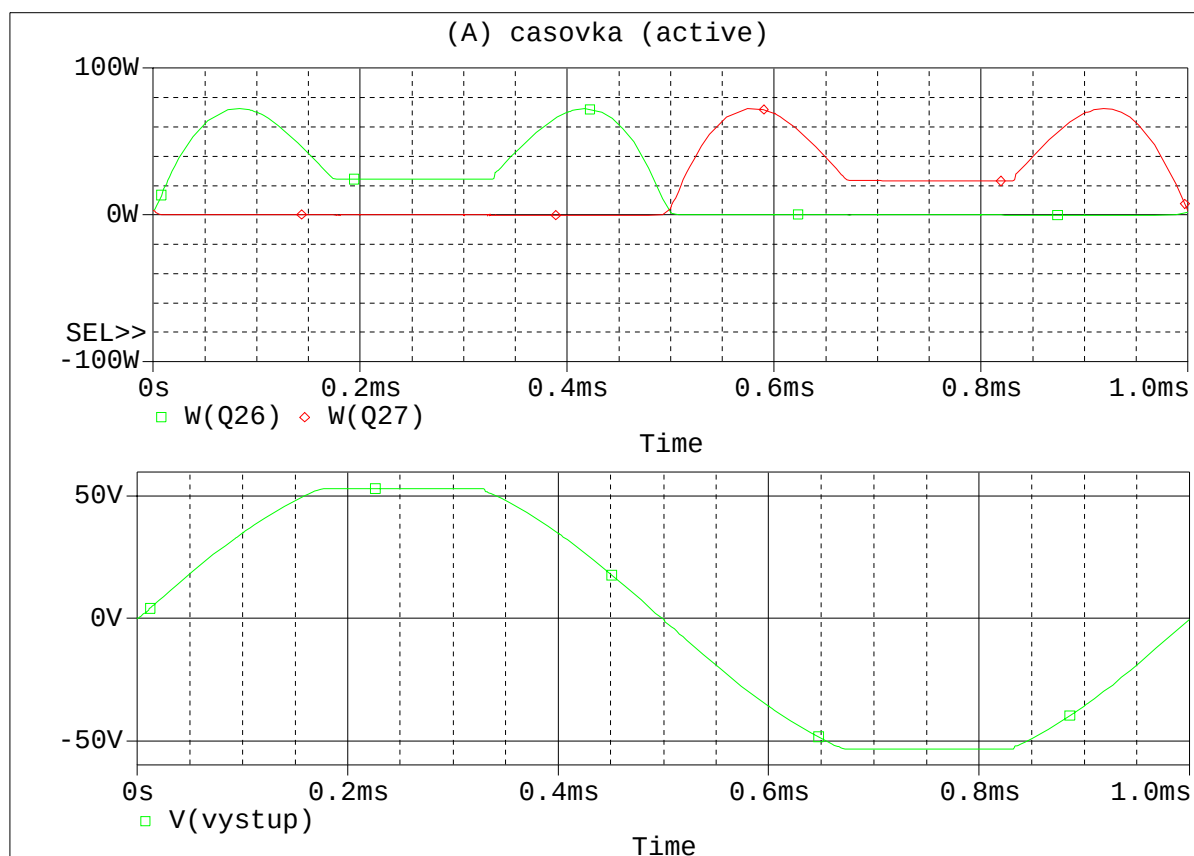
Obr. 2.13 Přenosová a fázová charakteristika koncového stupně



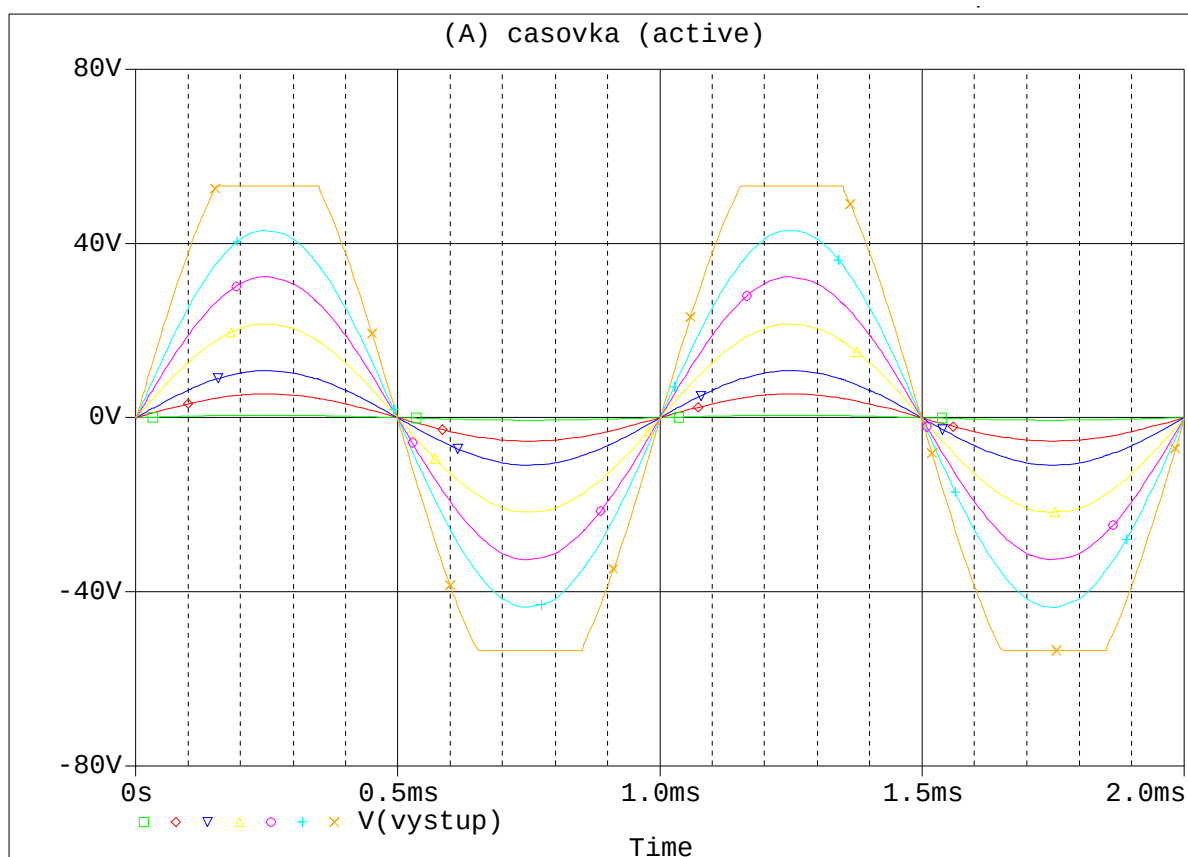
Obr. 2.14 Odezva zesilovače na obdélníkový signál s různou amplitudu vstupního signálu



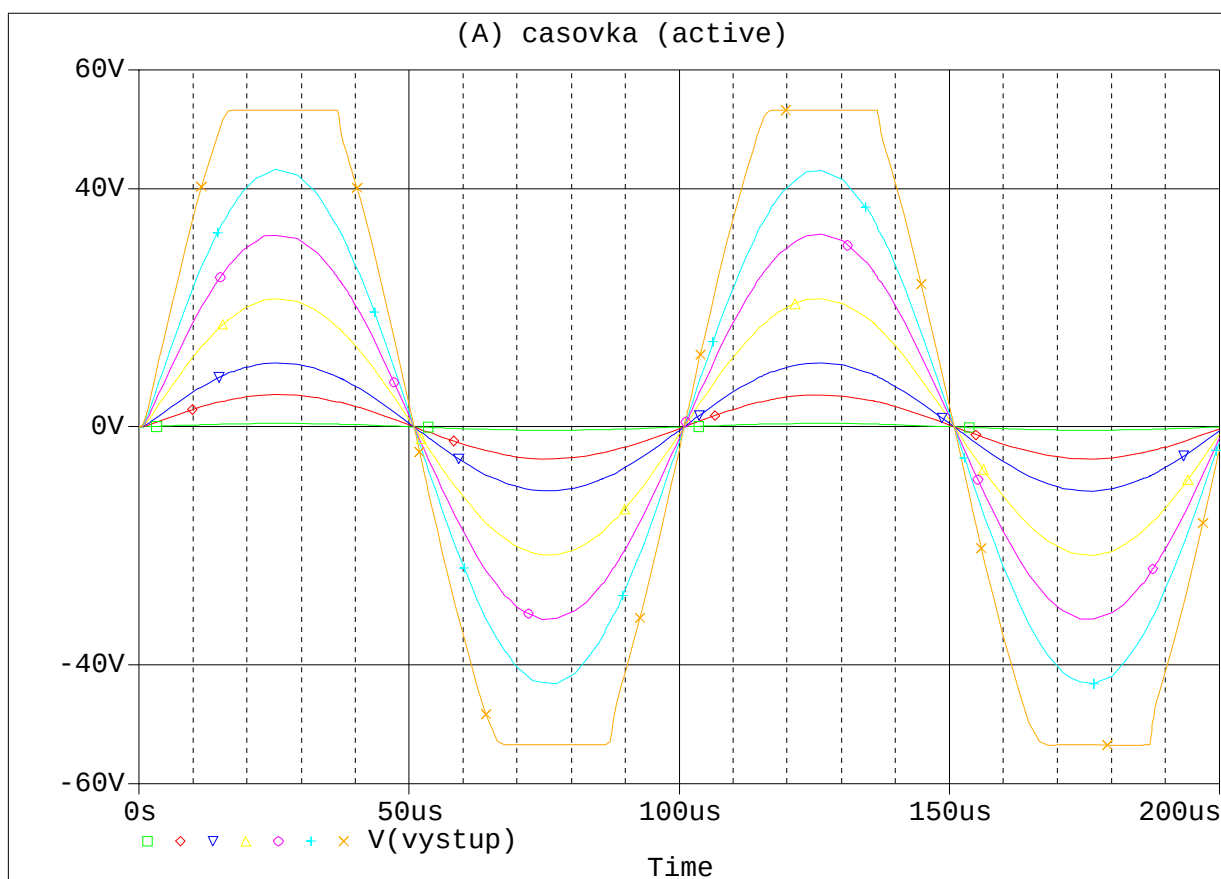
Obr. 2.15 Odezva zesilovače na obdél níkový signál, zvětšení hran pro určení SR



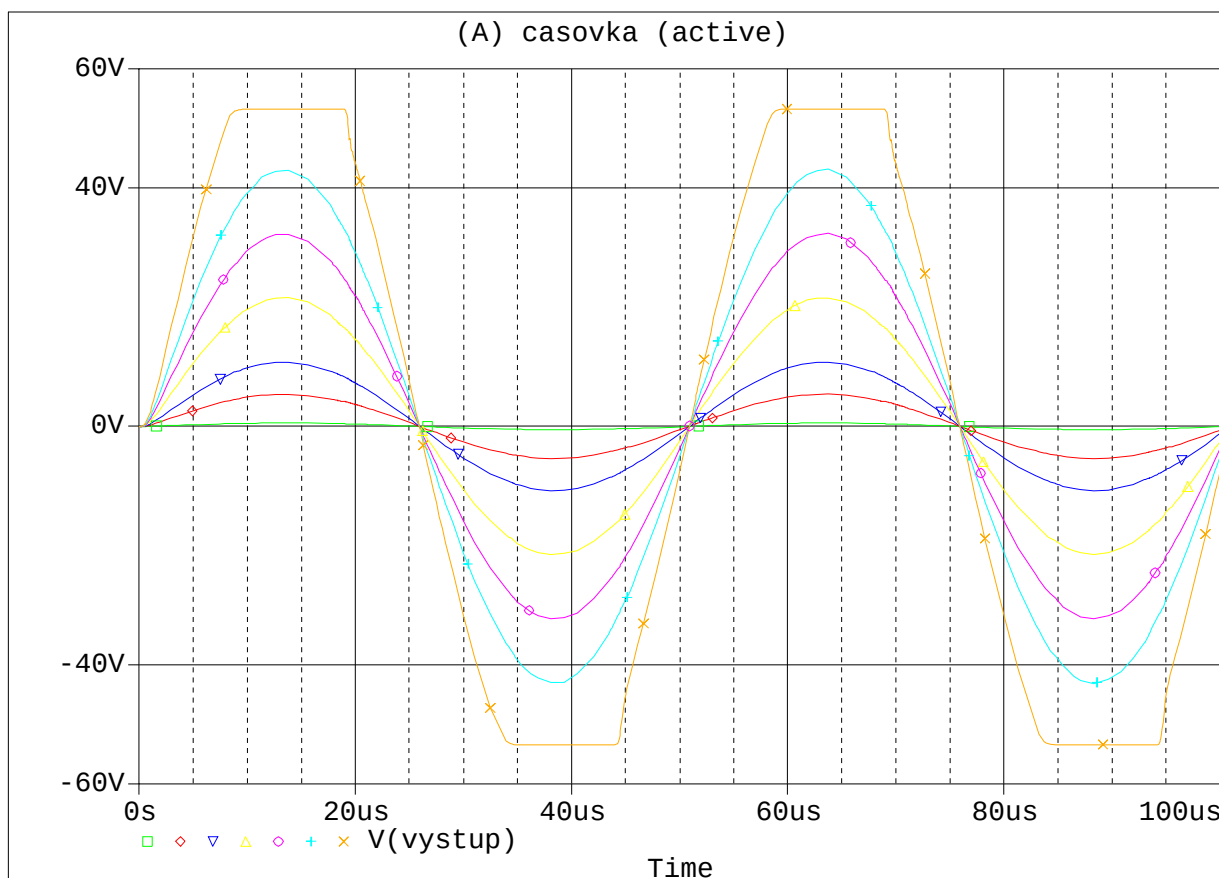
Obr. 2.16 Limitovaný signál $f = 1\text{kHz}$, ztrátový výkon na aktiv. prvcích a zátěži $R = 4\Omega$



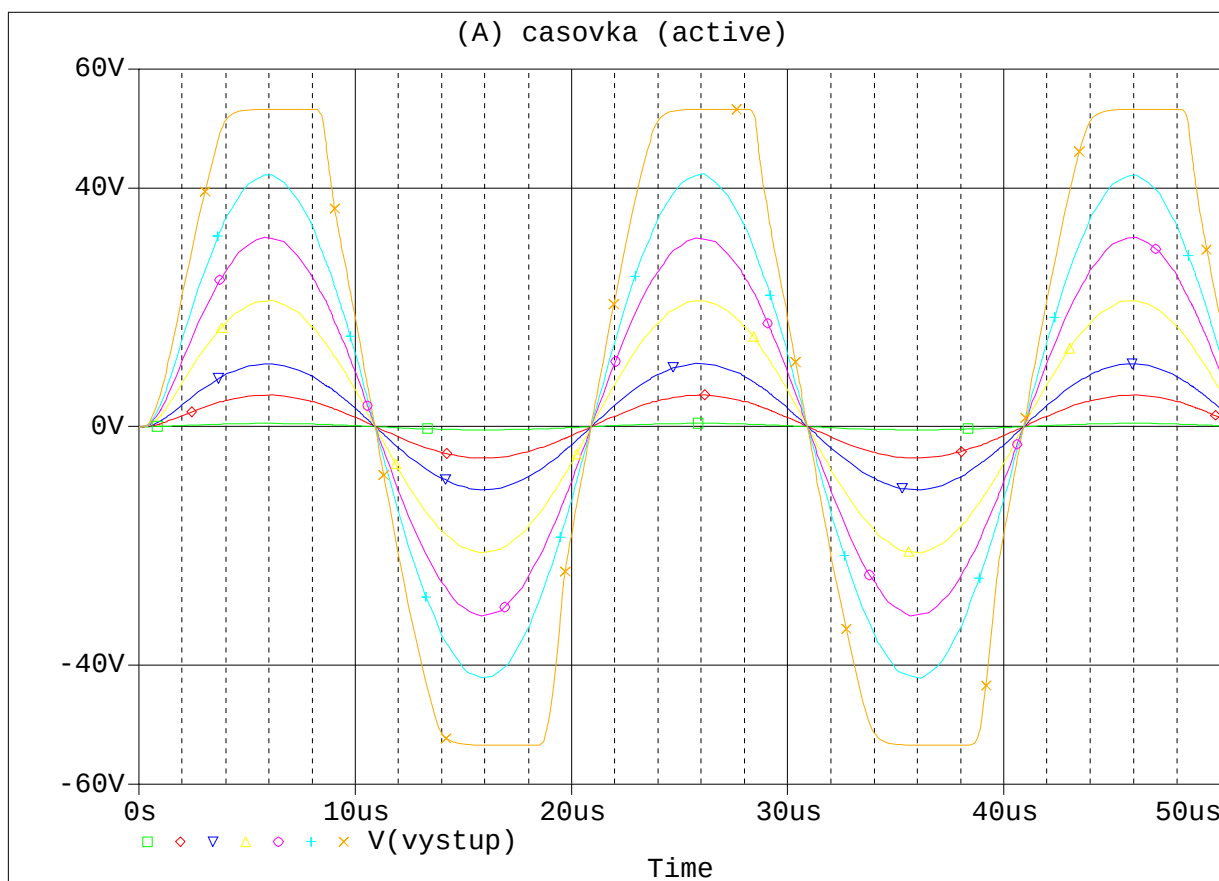
Obr. 2.17 Výstupní průběhy pro $f = 1\text{kHz}$, $R_z = 4\Omega$ a různou amplitudu na vstup. napětí



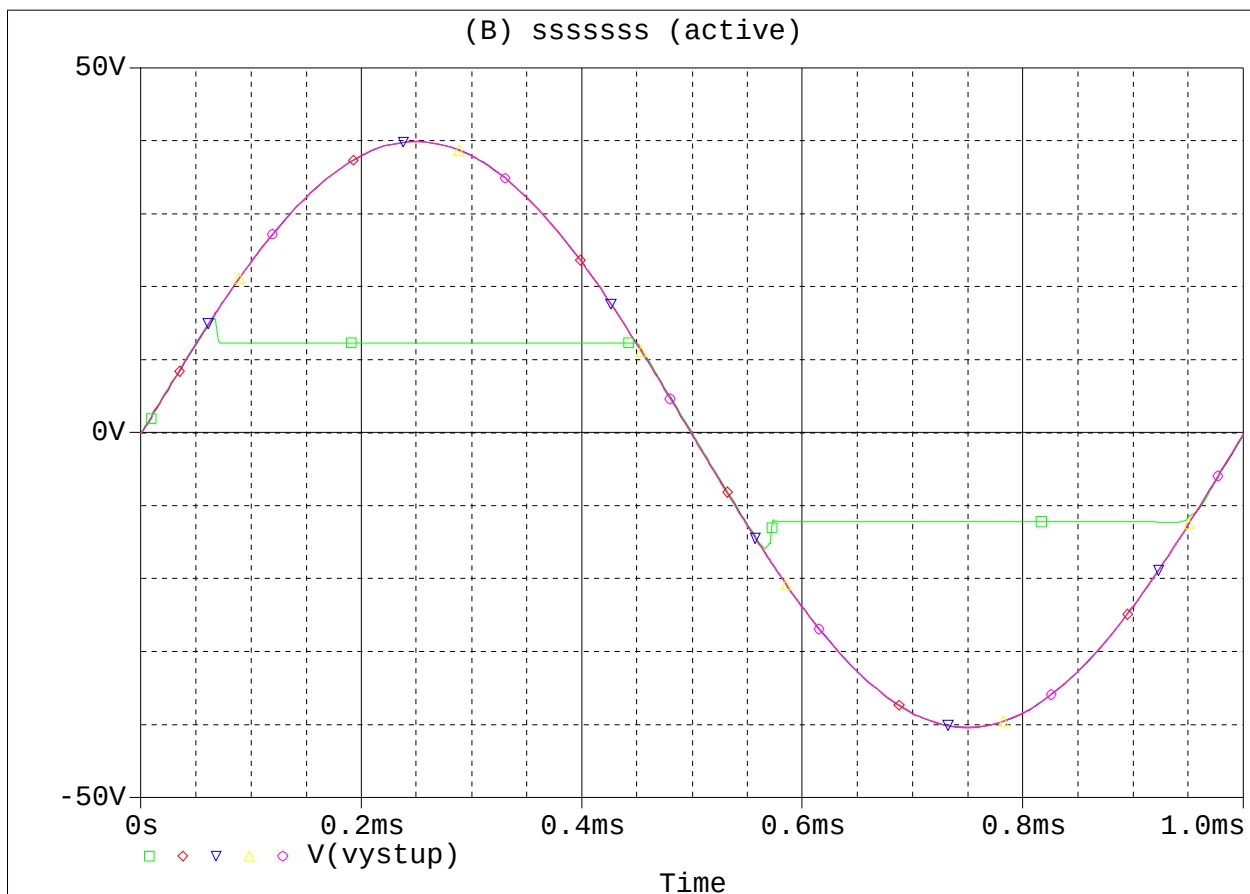
Obr. 2.18 Výstupní průběhy pro $f = 10\text{kHz}$, $R_z = 4\Omega$ a různou amplitudu na vstup. napětí



Obr. 2.19 Výstupní průběhy pro $f = 20\text{kHz}$, $R_z = 4\Omega$ a různou amplitudu na vstup. napětí



Obr. 2.20 Výstupní průběhy pro $f = 50\text{kHz}$, $R_z = 4\Omega$ a různou amplitudu na vstup. napětí

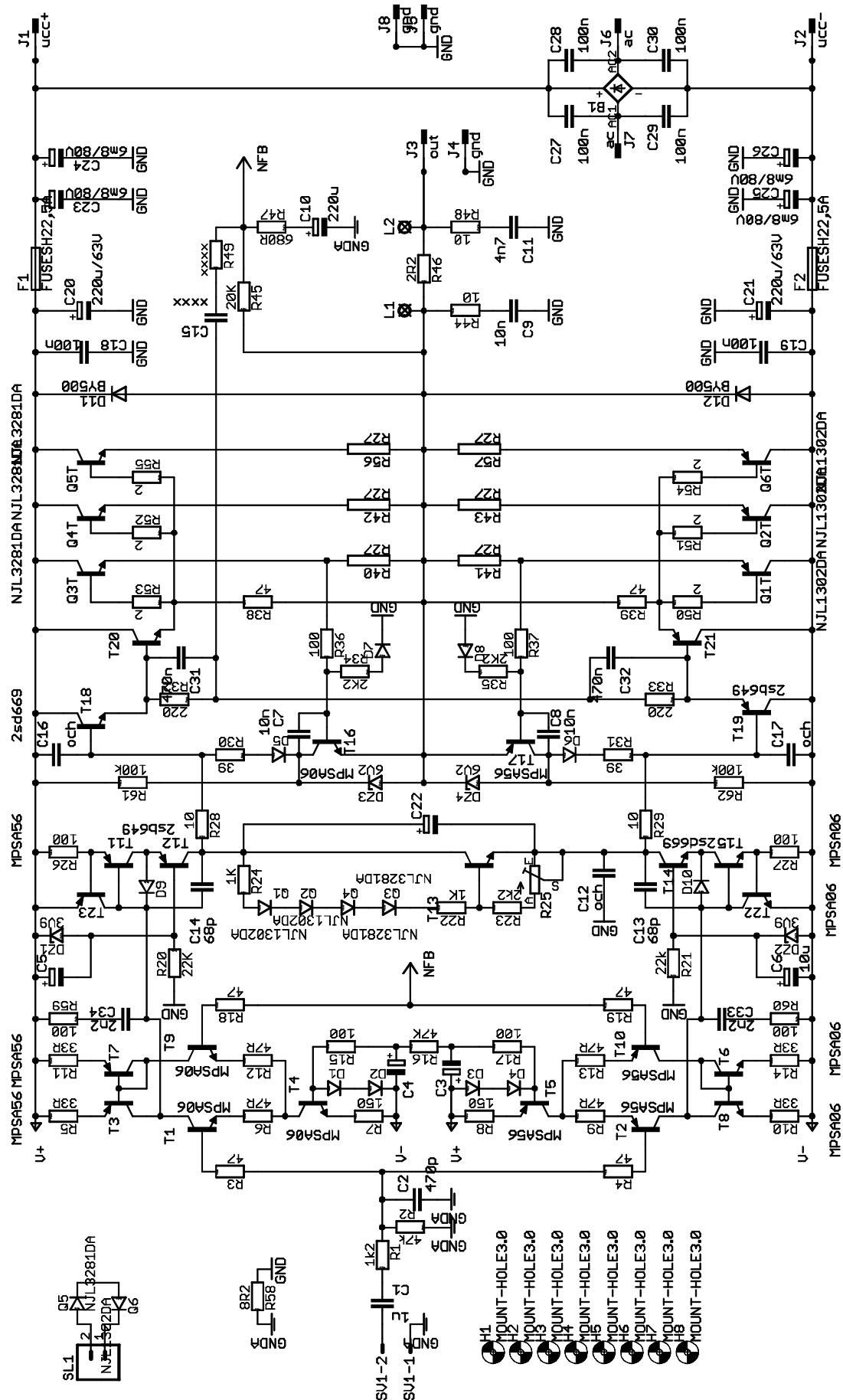


Obr. 2.21 Výstupní průběhy pro $f = 1\text{kHz}$, $U_{vst} = 4V_{pp}$ a různé velikosti zatěžovací impedance

Pozn.:

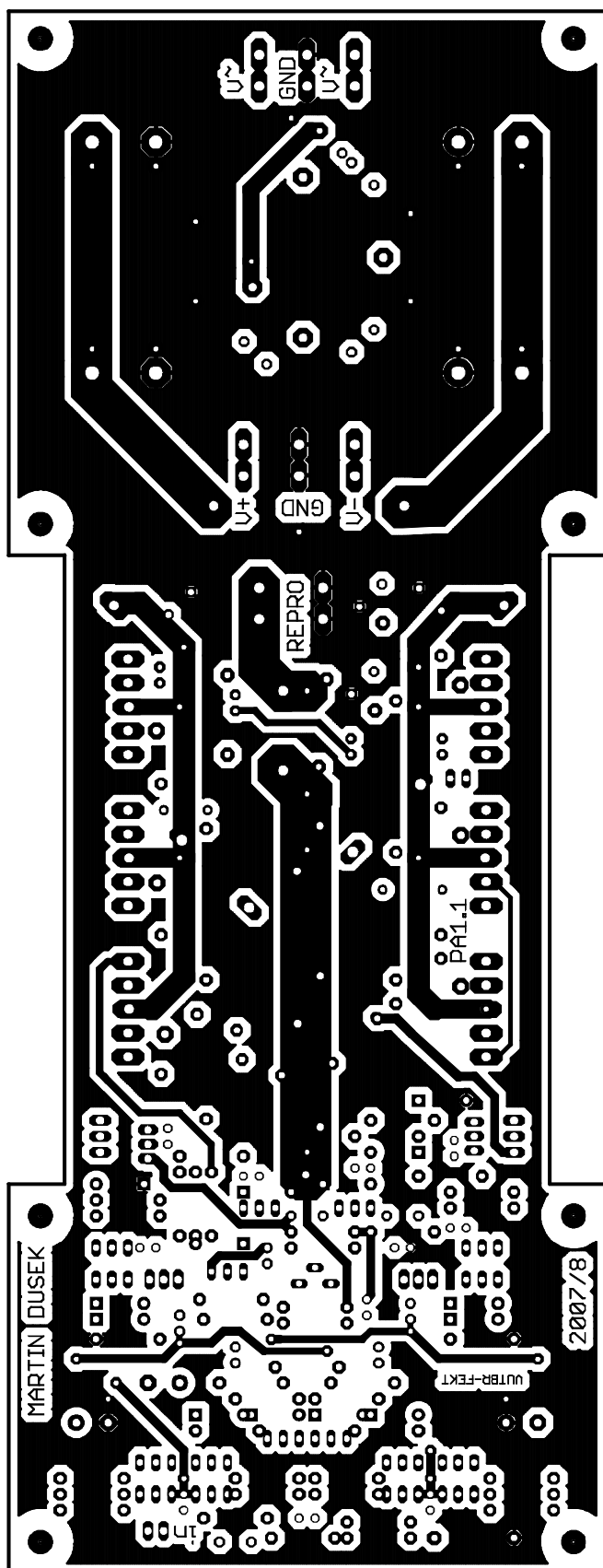
- Z Obr. 2.13 jsem odečetl pomocí kurzoru šířku přenášeného pásma, která mi vyšla cca 250kHz.
- Z Obr. 2.15 jsem z odečtených hodnot vypočetl rychlost přeběhu $52,3V/\mu s$ ($80,52V$ za $1,54\mu s$) na vzestupné a $61,7V/\mu s$ ($81,4V$ za $1,32\mu s$) sestupné hraně.
- Pro výstupní průběhy v závislostech na vstupním napětí (Obr. 2.17 až Obr. 2.20) jsem zvolil tyto hodnoty: $U_{vstpp} = \{50m; 500m; 1; 2; 3; 4; 6\}V$
- Pro výstupní průběhy v závislostech na zatěžovací impedanci (Obr. 2.21) jsem volil hodnoty: $R_z = \{1m; 1; 2; 4; 8; 16\} \Omega$

2.4.7 Schéma zapojení pro návrh DPS

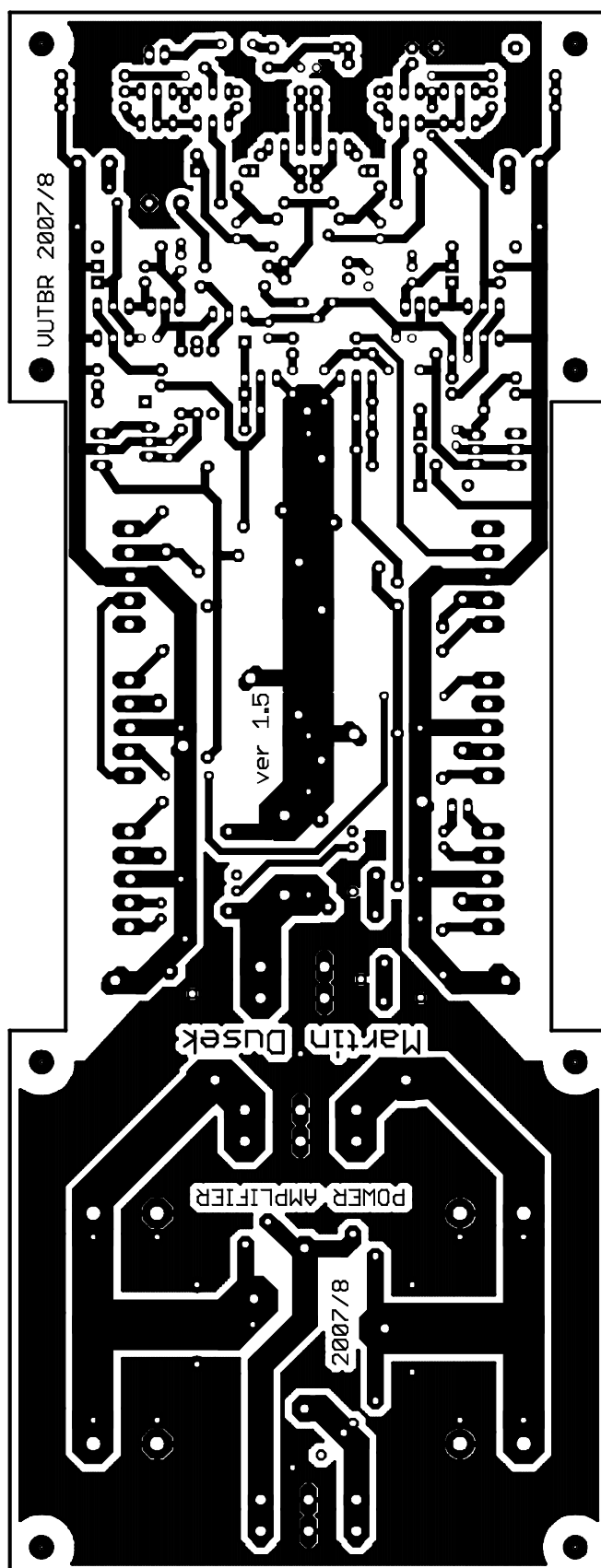


Obr. 2.22 Schéma zapojení desky koncového zesilovače včetně napájecího zdroje

2.4.8 Deska plošných spojů



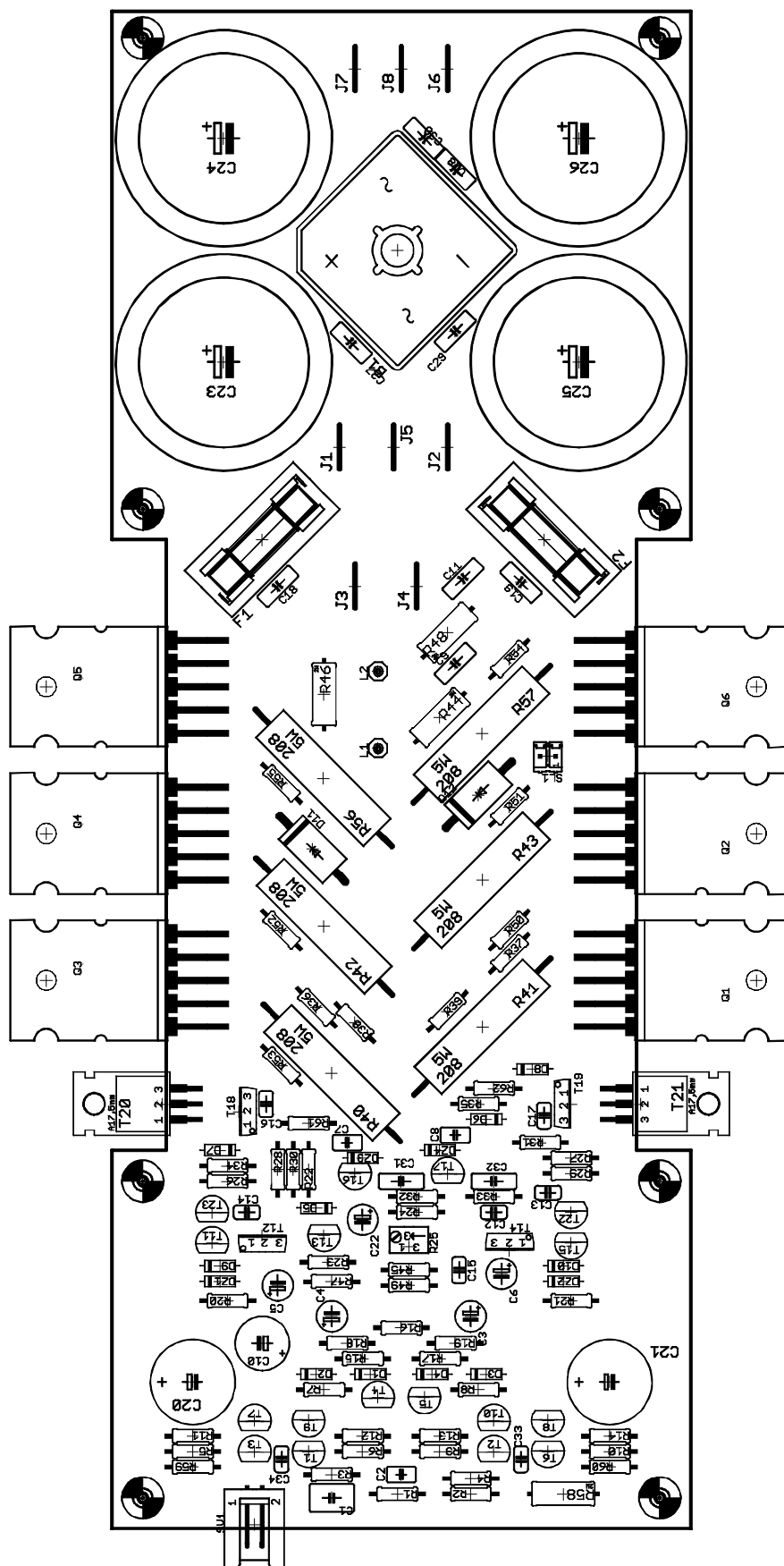
Obr. 2.23 Vrchní strana desky konc.stupně



Obr. 2.24 Spodní strana desky konc. stupně

Oba Obrázky (Obr. 2.22 a Obr. 2.23) jsou zmenšeny na 80% původní velikosti z důvodů velikosti větší než je tisková plocha stránky dokumentu.

2.4.9 Osazovací výkres



Obr. 2.25 Osazovací výkres desky koncového zesilovače (zmenšeno na 90%)

2.4.10 Seznam součástek

Název	Hodnota	Součástka	Počet
B1	Můstek 15A	FBM	1
C1	1u/63V	C5/4.5	1
C10	100u/63V bipolární	CPOL-EUE5-8.5	1
C11	47n	C5/2.5	1
C12, C16, C17	Neosazuje se (22p)	C-EU025-024X044	3
C13, C14	68p	C-EU025-024X044	2
C15	Neosazuje se	C-EU025-024X044	1
C18, C19, C27, C28, C29, C30	100n	C5/2.5	6
C2	470p	C-EU025-025X050	1
C20, C21	220u/63V	CPOL-EUE5-13	2
C22	10u/16V	CPOL-EUE2.5-5	1
C23, C24, C25, C26	10m/80V	CPOL-EUE10-35	4
C3, C4, C5, C6	10u	CPOL-EUE2.5-5	4
C31, C32	470n	C5/2.5	2
C33, C34	2n2	C-EU025-024X044	2
C7, C8	10n	C-EU025-025X050	2
C9	10n	C5/2.5	1
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10	1N4148	1N4148	10
D11, D12	BY500	BY500	2
DZ1, DZ2	3V9	BZX85V??	2
DZ3, DZ4	6V2	BZX85V??	2
F1, F2	Držák pojistky	FUSESH22,5A	2
J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8	FAST – ON 6.3mm	PIN2F061.100	8
L1, L2	Mezi cívkou 20 závitů 1,5mm lakovaným drátem		1
Q1, Q2, Q6	NJL1302DA	NJL1302DA	3
Q3, Q4, Q5	NJL3281DA	NJL3281DA	3
R1	1k2	R-10	1
R15, R17, R26, R27, R36, R37, R59, R60	100R	R-10	8
R16, R2	47K	R-10	2
R20, R21	22K	R-10	2
R22, R24	1K	R-10	2
R23	2k2	R-10	1
R25	2k5	TRIM_EU-B64W	1
R28, R29	10R	R-10	2
R3, R4, R18, R19, R38, R39	47R	R-10	6
R30, R31	39R	R-10	2
R32, R33	220R	R-10	2
R34, R35	2K2	R-10	2
R40, R41, R42, R43, R56, R57	R27 /5W	RKH208-8	6
R44, R48	10 /2W	R- 2W	2
R45 + paralelně kondenzátor 4p7	10K	R-10	1
R46	2R2 /2W	R- 2W	1
R47	680R	R-10	1
R49	Neosazuje se	R-10	1
R5, R10, R11, R14	33R	R-10	4
R50, R51, R52, R53, R54, R55	2R2 /1W	R- 1W	6
R58	8R2 /2W	R- 2W	1
R6, R9, R12, R13	47R	R-10	4
R61, R62	100k	R-10	2
R7, R8	150R	R-10	2
SL1	Konektor se zámkem	M02	1
SV1	Konektor se zámkem	L02P	1

T1, T4, T6, T8, T9, T13, T15, T16, T22	MPSA06	MPSA06-NPN-TO92-CBE	9
T12, T19	2sb649	-PNP-TO126V	2
T14, T18	2sd669	-NPN-TO126V	2
T2, T3, T5, T7, T10, T11, T17, T23	MPSA56	MPSA56-PNP-TO92-CBE	7
T20	MJE15032	-NPN-TO220	1
T21	MJE15033	-PNP-TO220	1

Tab. 2 Seznam součástek koncového zesilovače vygenerovaný v programu Eagle

Pozn. Na pozicích „Neosazuje se“ jsou prvky, kterými lze doladit v případě potřeby stabilitu.

2.4.11 Seznam změn pro osazení nesymetrické verze

C8, C32, C34, R1, R5, R12, R18, R59, T1, T3, T7, T11, T23	Neosazuje se (vynechá se)
C23	1n /keramika
R3, R6	2M7
R7	91k (řada E24)
R9, R13	68R
R10, R14	100R
R24	510R (řada E24)
R26	560R
R42	430R (řada E24)
R60	240R (řada E24)
Místo T1	Propojit vývody B a E
Místo T3	Propojit vývody C a E

Tab. 3 Seznam změn při osazování nesymetrické verze

2.5 Obvod ochrany a signalizace limitace koncového stupně

2.5.1 Popis a zapojení

Schéma obsahuje dva samostatné obvody. Ve vrchní části je ochrana koncového stupně a připojené zátěže. Tato ochrana se skládá ze čtyř částí.

Vstupní část s tranzistory Q4, Q2 a Q5 sleduje napětí na kondenzátoru C1 a pokud je napětí vyšší než 1V nebo nižší než -1,7, objeví se na vodiči $\underline{tr}$ téměř nulová úroveň ($\underline{tr}$ vychází z kolektorů Q1 a Q5). Diody D1 a D2 jsou ochranné prvky a vstupní RC článek (R1, C1) propouští pouze velmi nízké kmitočty a stejnosměrnou složku ($f_{mez} = 0,14\text{Hz}$).

Druhou část tvoří tranzistor Q8 (spojení báze s emitorem je pouze pro účel simulace), jehož báze je vyvedena na konektor MP, který lze použít spínání např. mikroprocesorem, který může obsluhovat další ochrany (např. při přehřátí). Po sepnutí tranzistoru je na vodiči $\underline{tr}$ také téměř nulová úroveň.

Třetí sub obvod je tvořen R3, R4, C3 a D7. Součástky R3, R4, C3 zajišťují opožděné připojení zátěže. Po připojení napájení se kondenzátor C3 nabíjí (napětí na něm je stejné jako na vodiči $\underline{tr}$) přes rezistory R3 a R4, velikost R3 a C3 určuje čas zpoždění. Dioda D7 kondenzátor C3 po odpojení napájení rychle vybije přes ochranný rezistor R4, čímž se zajistí, že i při krátkodobém výpadku napájení bude obvod fungovat jak má (tj. časová konstanta zpoždění zůstane stejná). R4 určuje max. velikost vybíjecího proudu (který bude protékat přes D7).

Poslední část tvoří Darlingtonova dvojice tranzistorů Q2, Q3 Zenerova dioda D6, ochranná dioda D5, cívka relé (zde R6) a rezistor R15. Pokud je napětí na bázi Q2 (tj. úroveň na vodiči $\underline{tr}$) vyšší než napětí na D6 a přechodů BE obou tranzistorů, Q3 je sepnutý a obvodem R15, R6, Q3 a D6 protéká proud, který sepne relé a připojí zátěž k výstupu koncového stupně. Dioda D5 zajišťuje, aby se napětí vzniklé na cívce při odpojování zátěže nepřičetlo k napájecímu napětí a neprorazilo spínací tranzistor. D6 se podílí na čase sepnutí a snižuje napětí, které se ztrácí na R15, aby na relé bylo jmenovité napětí. Velikost rezistoru spočítáme dle vztahu:

$$R15 = \frac{U_n - U_{D6} - U_{Q3sat} - U_{rele}}{I_{rele}} \quad (2.1)$$

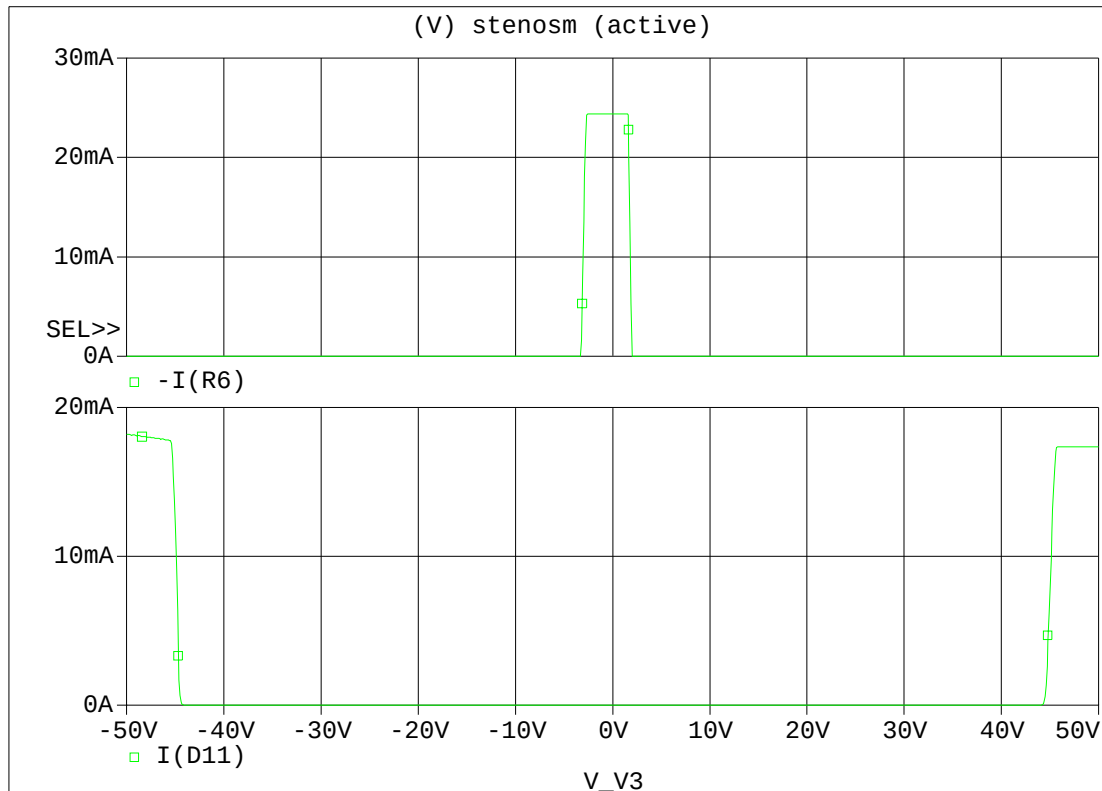
Druhý obvod ve schématu je CLIP DETECTOR. Tento obvod vyhodnocuje výstupní napětí koncového zesilovače s jeho napájením a je-li výstup napětí v blízkosti limitace, pak začne diodou D11 (a dalšími prvky) protékat proud a dioda se rozsvítí.

Vstupní odpory R7, R8, R9, R10 tvoří dělič, který je vždy proti opačné polaritě napětí než je vstup napětí. Např. pro $U_{vst} = 45\text{V}$ a $U_n = \pm 55\text{V}$ bude na výstupu děliče R7, R10 napětí 57,14V, což je po odečtení 55V (napájení) hodnota 2,14V proti zemi. Toto napětí je na bázi Q6. Je-li toto napětí větší než 2,1V (U_{BEQ6} , U_{BEQ7} , U_{D9}), pak protéká proud báze Q6 přes Q7 a D9 na zem. Proud otevře Q6 a Q7 a obvodem R11, D11, D10, Q6, Q7 a R2 protéká proud, který rozsvítí signalizační diodu (D11). Podobně obvod funguje i pro zápornou půlvlnu, avšak pro vstupní napětí a proudy se uplatňují R8, R9, Q7, Q6 a D8.

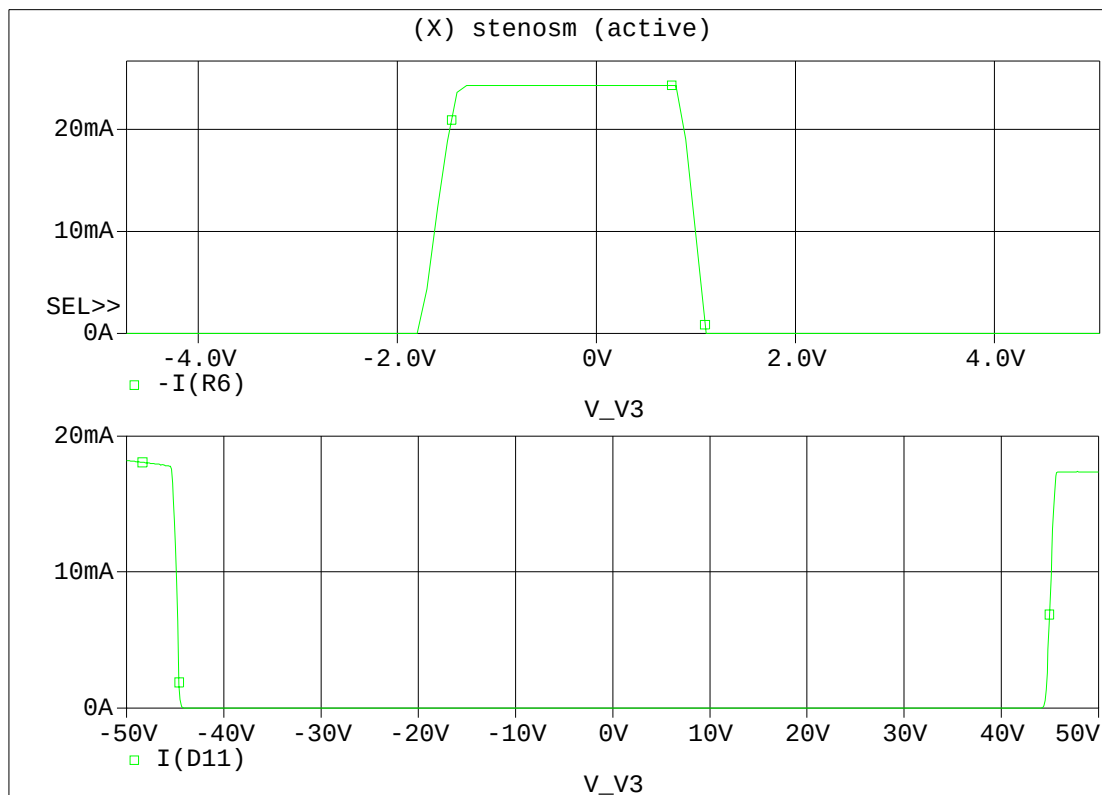
C2 a R13 zajišťují, aby svit diody byl dostatečně dlouhý, abychom postřehli i krátké špičky v signálu. D10 zabraňuje přepólování kondenzátoru C2.

Toto zapojení pochází ze stránek profesora W. Marshall Leache [14].

2.5.2 Výsledky simulací v PSpice

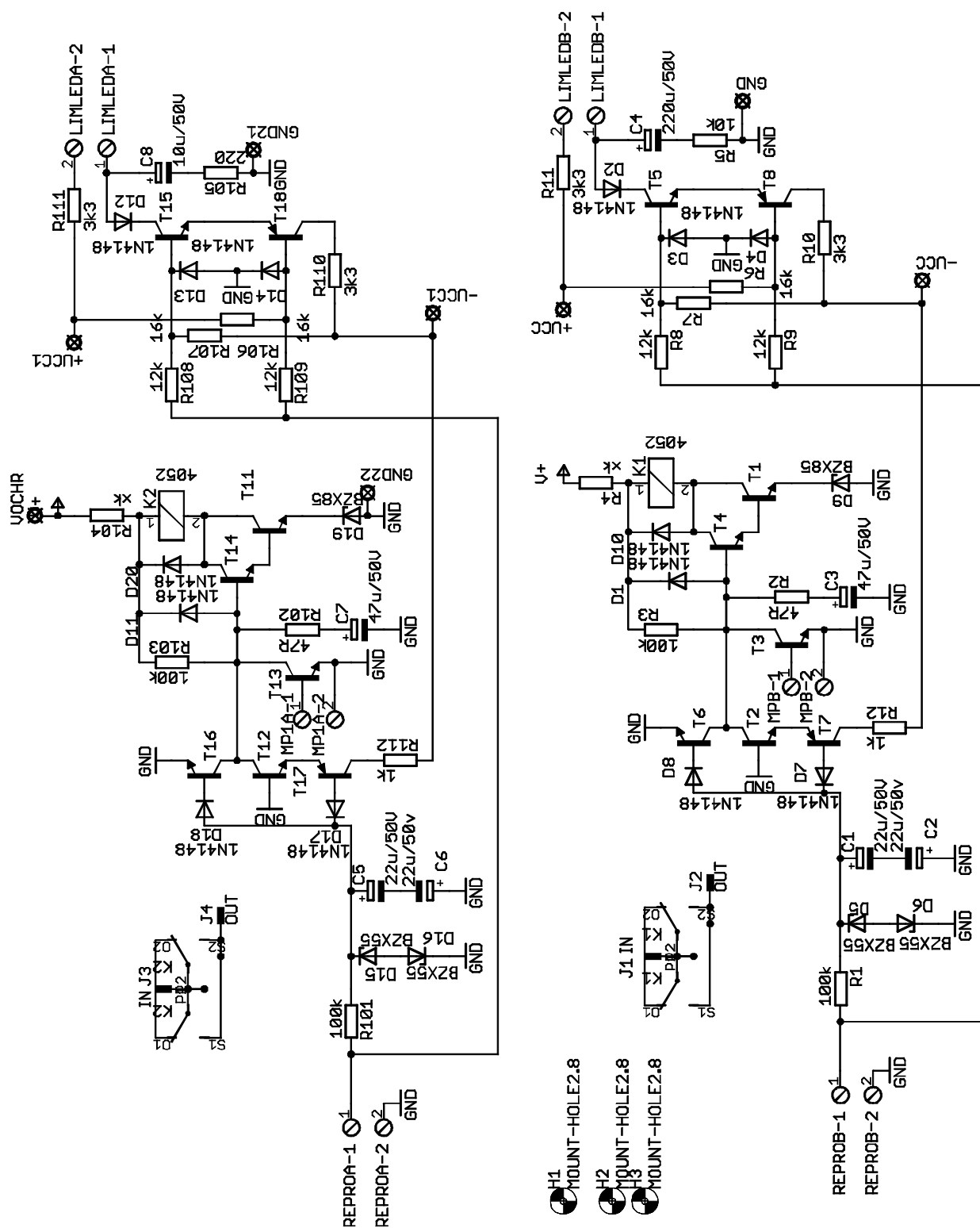


Obr. 2.26 Závislost proudu výstupního prvku (relé, LED dioda) na ss. vstupním napětí



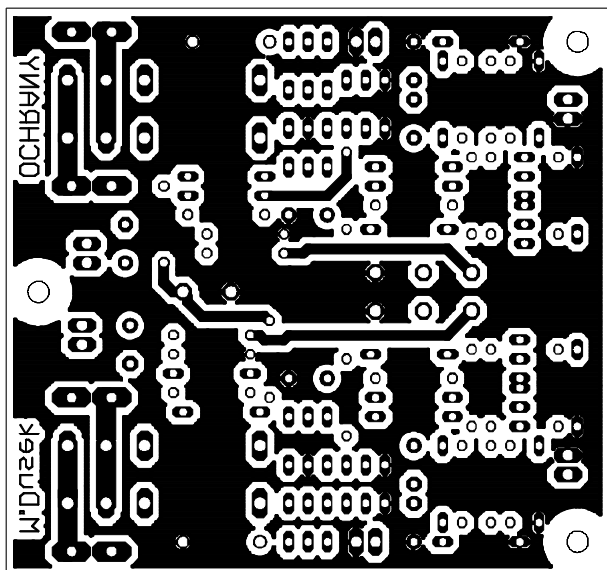
Obr. 2.27 Závislost proudu výstupního prvku (relé, LED dioda) na ss. vstupním napětí

2.5.3 Schéma zapojení pro návrh DPS

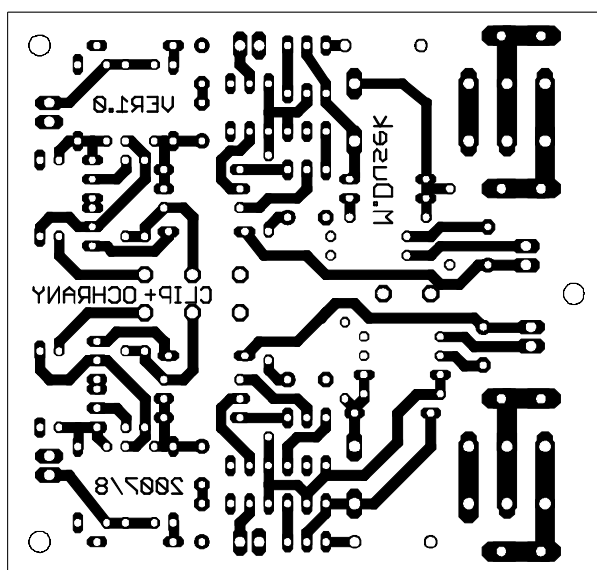


Obr. 2.28 Schéma zapojení na desce ochran

2.5.4 Deska plošných spojů

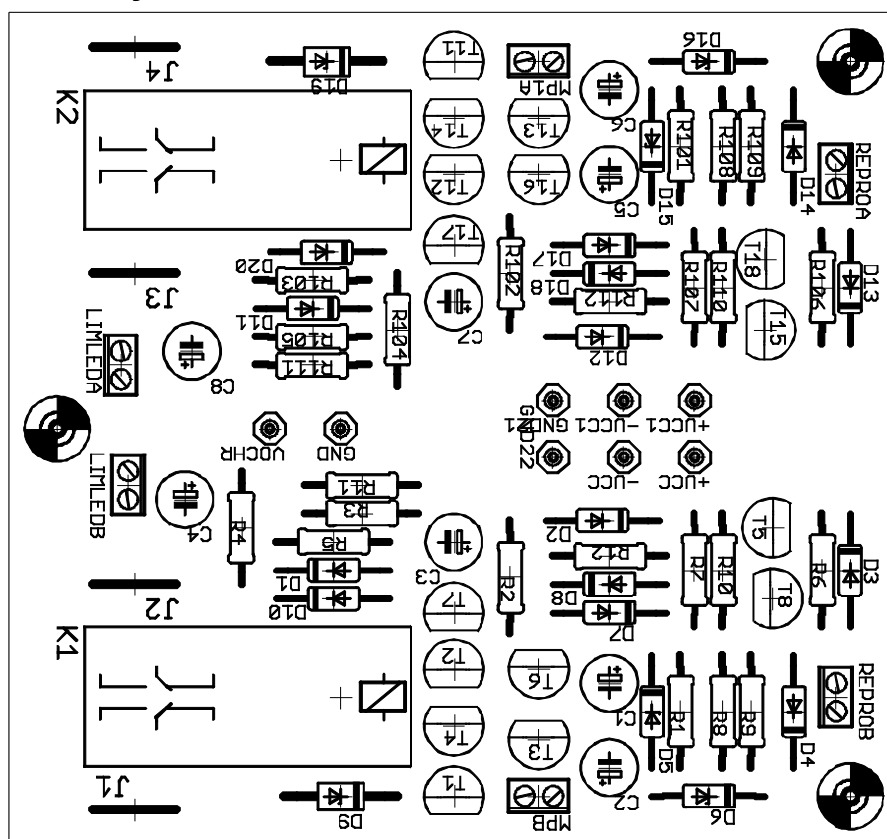


Obr. 2.29 Vrchní strana desky ochran



Obr. 2.30 Spodní strana desky ochran

2.5.5 Osazovací výkres



Obr. 2.31 Osazovací výkres desky ochran

2.5.6 Seznam součástek

Název	Hodnota	Součástka	Počet
T1, T11	BC639	BC639-NPN-TO92-BCE	2
T2, T3, T4, T5, T6, T12, T13, T14, T15, T16	MPSA06	MPSA06-NPN-TO92-CBE	10
T7, T8, T17, T18	MPSA56	MPSA56-PNP-TO92-BCE	4
D1, D2, D3, D4, D7, D8, D10, D11, D12, D13, D14, D17, D18, D20	1N4148	1N4148	14
R12, R112	1k	R-EU_0207/10	2
R10, R11, R110, R111	3k3	R-EU_0207/10	4
R5	10k	R-EU_0207/10	1
C8	10u/50V	CPOL-EUE5-5	1
R8, R9, R108, R109	12k	R-EU_0207/10	4
R6, R7, R106, R107	16k	R-EU_0207/10	4
C1, C5	22u/50V	CPOL-EUE5-5	2
C2, C6	22u/50v	CPOL-EUE5-5	2
R2, R102	47R	R-EU_0207/10	2
C3, C7	47u/50V	CPOL-EUE5-5	2
R1, R3, R101, R103	100k	R-EU_0207/10	4
R105	220	R-EU_0207/10	1
C4	220u/50V	CPOL-EUE5-5	1
K1, K2	4052	4052	2
D5, D6, D15, D16	BZX55	BZX55	4
D9, D19	BZX85	BZX85	2
R4, R104	Viz. (3.1)	R-EU_0207/10	2

Tab. 4 Seznam součástek ochran vygenerovaný v programu Eagle

2.6 Obvod mikroprocesorového ovládání zesilovače

2.6.1 Popis a zapojení

Tento obvod je určen k řízení celého zesilovače. Využívat mikroprocesor pouze na přepínání vstupů by bylo zbytečné, implementoval jsem do tohoto modulu tyto funkce:

- o Přepínání vstupů se ztlumením zesilovače během vlastního přepnutí
- o Sledování teploty na chladičích, indikaci přehřátí a odpojení zátěže
- o Vypínání korekcí
- o Režim funkce mute, s odpojením zátěže po určité době

Obvod je realizován mikroprocesorem (dále MP.) ATMEGA8 firmy ATMEL, který obsahuje celkem 22 vstupně/výstupních pinů. Z těchto pinů mohou dva být použity pro externí krystalový oscilátor. Další 4 mohou být využity pro sledování teploty (využití interního D/A převodníku).

Pět pinů je zde využito pro ovládací prvky, kde jsou tlačítka zapojena do matice 3x2. Z toho jsou 3 piny výstupní a mění se na nich rotačně (1 – 2 – 3 – 1 ..) výstupní úrovně, na kterou reagují vstupy INT0 a INT1 a při stisku některého tlačítka vznikne přerušení, které je vyhodnoceno. Obvod vyčká do rozepnutí tlačítka tak, že ho po určeném čase otestuje na přítomnost úrovně a je-li tlačítko rozpojeno, poté pokračuje MP v práci. Pro rotaci úrovní na tlačítkách je použit interní časovač.

Jedenáct pinů je použito jako výstupních, 3 slouží pro signalizaci (LED diody), 4 pro ovládání vstupů, 2 pro ovládání odpojení zátěže, 2 pro ovládání optočlenů v korekčním předzesilovači. LED diody jsou použity nízkopříkonové (2mA), aby nebyla překročena maximální výkonová ztráta na pinu MP. Výstupy jsou výkonově odděleny pomocí tranzistorů, aby bylo možné zajistit vyšší spínací proud a přitom nezatěžovat MP. Spínání optočlenů pro jejich příkon (katalogově 16mA) je též pomocí tranzistorů.

Deska obsahuje vlastní stabilizátor napětí typu 78L05 (maximální stabilizovaný proud 100mA obvod nepřekročí). Obsahuje též konektor JP1 pro naprogramování obvodu (případné změny v programu lze kdykoliv nahrát). Diody LD9 a LD10 jsou zde pro signalizaci informace o limitaci koncového stupně a jsou připojeny na modul ochran.

Výpočet některých součástí

$$R_1, R_2, R_3 = \frac{U_{nap} - U_{spin} - U_{refLED}}{I_{refLED}} = \frac{5 - 0,5 - 1,8}{2m} = 1,35k\Omega \Rightarrow 1k5 \quad (2.2)$$

U_{spin} napětí v nízké úrovni MP (datasheet)

U_{refLED} ..úbytek napětí na červené LED diodě

I_{refLED} ...proud procházející LED diodu

$$R_4 = \frac{U_{nap} - U_{spin} - U_{refLED} - U_{BE}}{I_{refLED}} = \frac{5 - 0,5 - 1,8 - 0,6}{2m} = 1,05k\Omega \Rightarrow 1k1 \quad (2.3)$$

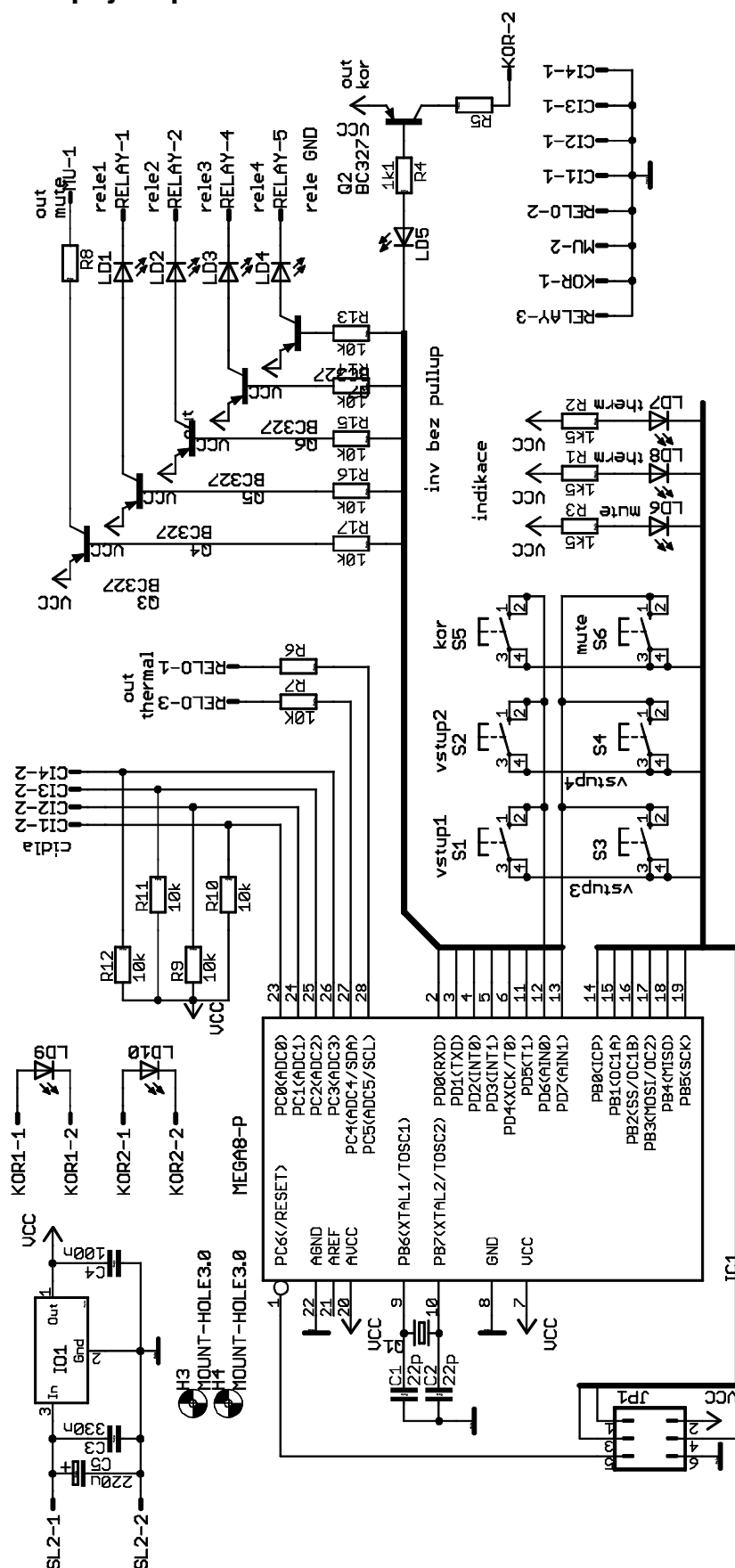
$$R_5, R_8 = \frac{U_{nap} - U_{CEsat} - U_{refOč}}{2 \cdot I_{refOč}} = \frac{5 - 0,4 - 1,5}{2 \cdot 15m} = 103\Omega \Rightarrow 110R \quad (2.4)$$

$U_{refOč}$..úbytek napětí na optočlenu

$I_{refOč}$...proud procházející optočlenem

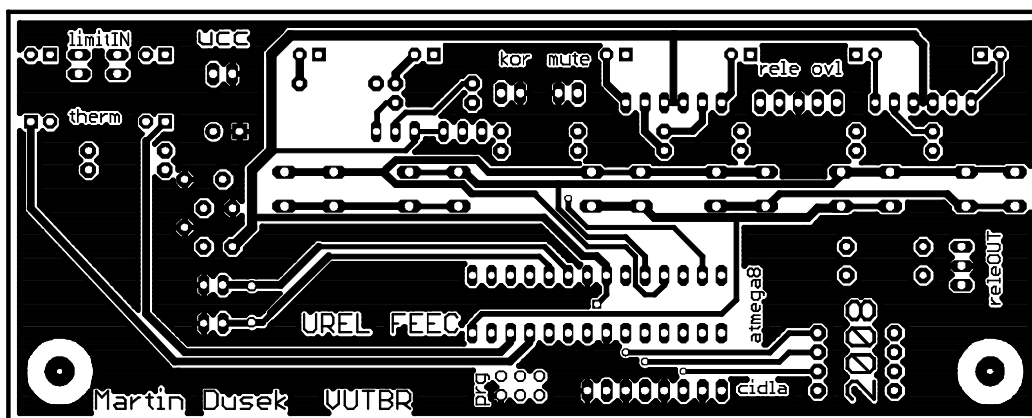
Program včetně stručného popisu jednotlivých příkazů je přiložen v příloze.

2.6.2 Schéma zapojení pro návrh DPS

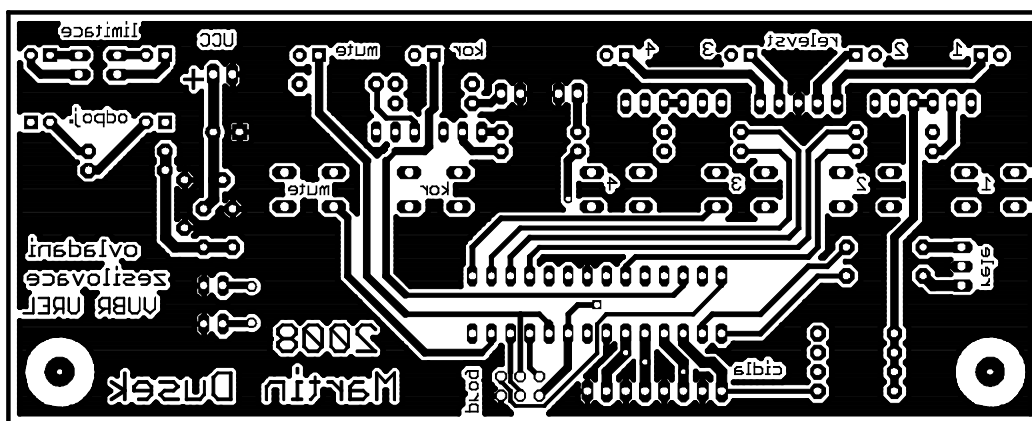


Obr. 2.32 Schéma zapojení modulu mikroprocesorového ovládání

2.6.3 Deska plošných spojů

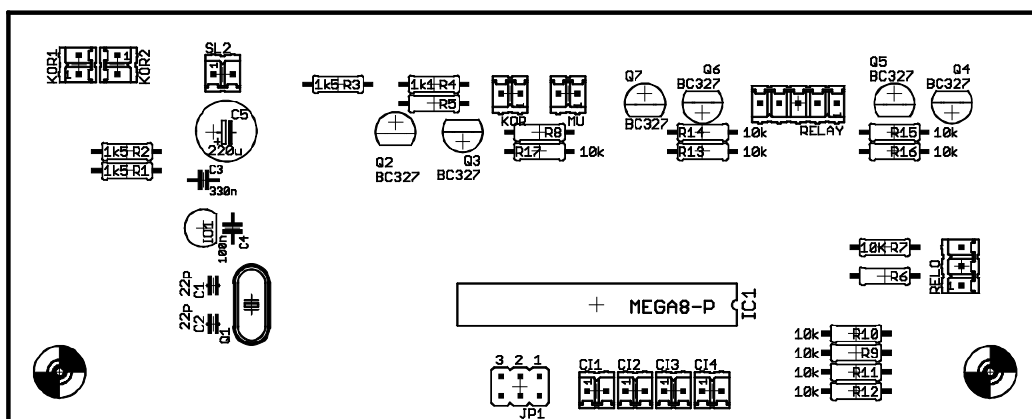


Obr. 2.33 Vrchní strana desky mikroprocesorového ovládání

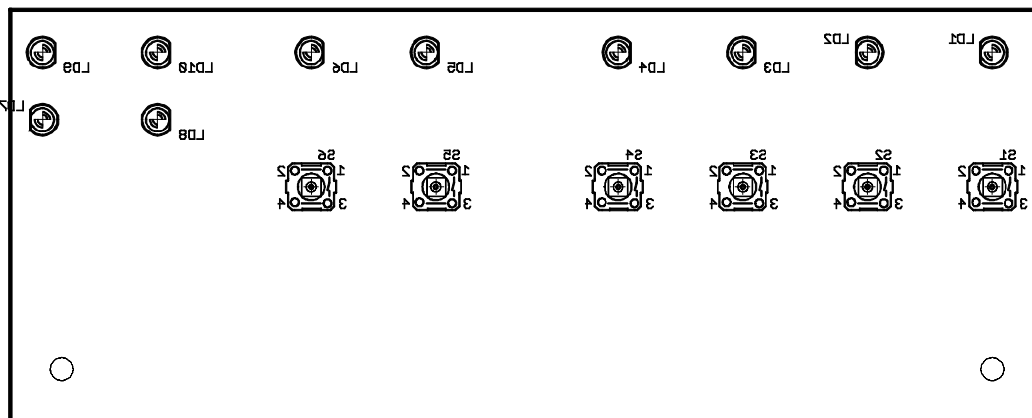


Obr. 2.34 Spodní strana desky mikroprocesorového ovládání

2.6.4 Osazovací výkres



Obr. 2.35 Osazovací výkres desky mikroprocesorového ovládání (TOP)



Obr. 2.36 Osazovací výkres desky mikroprocesorového ovládání (BOTTOM)

2.6.5 Seznam součástek

Název	Hodnota	Součástka	Počet
S1, S2, S3, S4, S5, S6		Mikrospínač	6
IO1	78L05	78L?	1
Q1	12MHz	CRYSTALHC49U-V	1
JP1		JP3Q	1
LD1, LD2, LD3, LD4, LD5, LD6, LD7, LD8, LD9, LD10	2mA	LED3MM	10
CI1, CI2, CI3, CI4, KOR, KOR1, KOR2, MU, SL2		M02S	9
RELO		M03S	1
RELAY		M05S	1
R5, R6, R8		R-10	3
R4	1k1	R-10	1
R1, R2, R3	1k5	R-10	3
R7	10K	R-10	1
R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17	10k	R-10	9
C1, C2	22p	C-2,5	2
C4	100n	C-5	1
C5	220u	C-EL_3,5	1
C3	330n	C-5	1
Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7	BC327	BC327	6
IC1	ATMEGA8-P	ATMEGA8-P	1

Tab. 5 Seznam součástek mikroprocesorového ovládání vygenerovaný v programu Eagle

2.7 Obvod přepínače vstupů

2.7.1 Popis a zapojení

Modul zajišťuje propojení vybraného vstupu s další periferií (korekční předzesilovač). K výběru vstupu jsou v tomto zapojení dvojité signálové relé, která zajišťují oproti elektronický analogovým přepínačům téměř nulové přeslechy, nemají problém s impedančním přizpůsobením ani jinými neduhy těchto zařízení.

Vstup relé je propojen s konektorem (cinch) přes rezistor 1k a zemnicí část konektoru je připojena na zem přes 10R vyrovnávací odpor, který by měl zamezit brumům při zapojení více zařízení současně. Výstupy relátek jsou spojeny a přivedeny na CR článek, který zajistí galvanické oddělení signálu. Signál je poté přiveden na sledovač, který signál přizpůsobí vstupu korekčního zesilovače. Rezistory o hodnotě 100R, kterými je signál při odpojení vstupu sveden k zemi, nemusí být použita a v návrhu jsou pro případ, že zdroj signálu vyžaduje minimální zátěž, hodnota 100R není konečná a lze ji změnit dle připojeného zařízení.

Relé jsou na napětí 24V a jsou ovládána řídicím modulem. Aby nebyl tento modul přetížen, jsou zde spínací tranzistory (T1 až T4). K ochraně tranzistorů před naindukovaným napětím na cívkách relátek jsou přidány diody, které uzavírají okruh tak, aby se napájecí napětí s napětím naindukovaným nemohly sečíst.

Zem pro ovládání 24V a signálová zem pro vstupy jsou odděleny, pro případ jiného potenciálu ovládání.

Výpočet bázevých odporů:

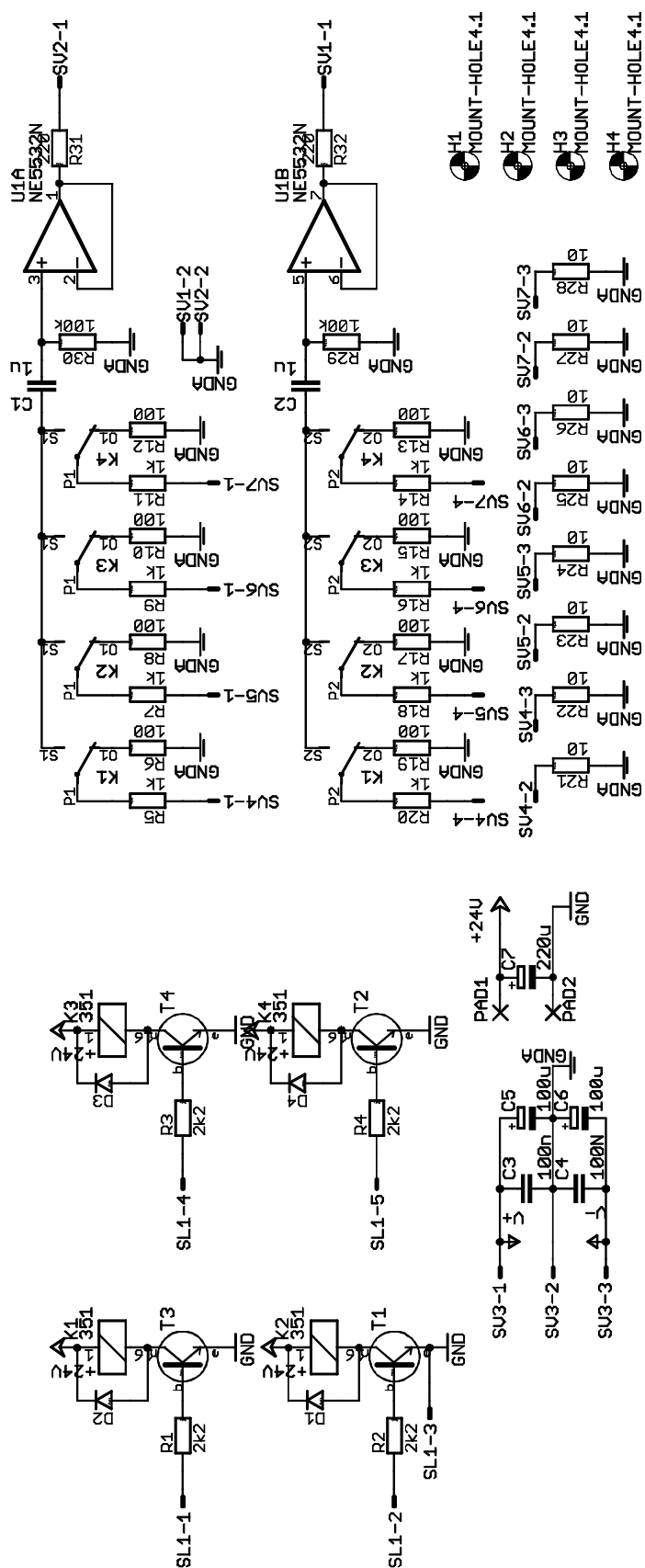
$$R_1, R_2, R_3, R_4 = \frac{U_{spin} - U_{refLED} - U_{BE}}{I_{refLED}} = \frac{4,5 - 2,6 - 0,6}{2m} = 650\Omega \Rightarrow 680R \quad (2.5)$$

U_{spin} napětí vysoké úrovně z řídicího modulu

U_{refLED} ...úbytek napětí na zelené LED diodě

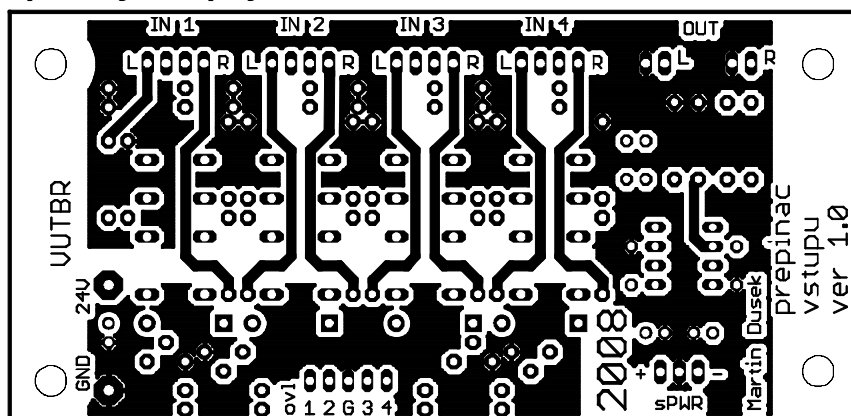
I_{refLED} ...proud procházející LED diodu

2.7.2 Schéma zapojení pro návrh DPS

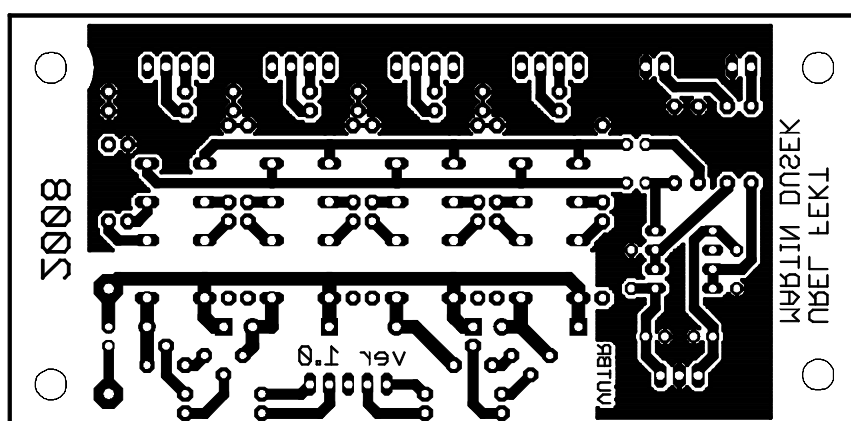


Obr. 2.37 Schéma zapojení desky přepínače vstupů

2.7.3 Deska plošných spojů

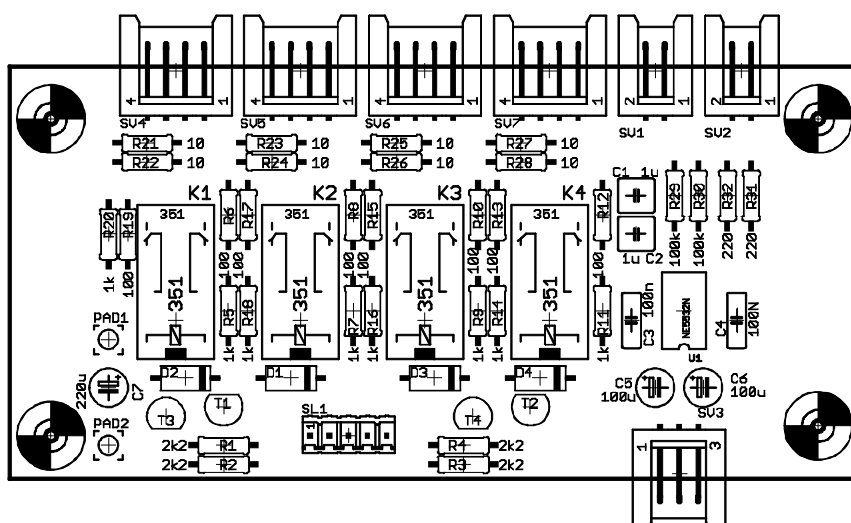


Obr. 2.38 Vrchní strana desky přepínače vstupů



Obr. 2.39 Spodní strana desky přepínače vstupů

2.7.4 Osazovací výkres



Obr. 2.40 Osazovací výkres desky přepínače vstupů

2.7.5 Seznam součástek

Název	Hodnota	Součástka	Počet
D1, D2, D3, D4		1N4007	4
T1, T2, T3, T4		BC546	4
SV1, SV2		L02P	2
SV3		L03P	1
SV4, SV5, SV6, SV7		L04P	4
SL1		M05S	1
R5, R7, R9, R11, R14, R16, R18, R20	1k	R-10	8
C1, C2	1u	C2.5/5	2
R1, R2, R3, R4	2k2	R-10	4
R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R28	10R	R-10	8
R6, R8, R10, R12, R13, R15, R17, R19	100R	R-10	8
C4	100N	C5/2.5	1
R29, R30	100k	R-10	2
C3	100n	C5/2.5	1
C5, C6	100u	CPOL-EUE2.5-5	2
R31, R32	220R	R-10	2
C7	220u	CPOL-EUE2.5-5	1
K1, K2, K3, K4	351	rele351	4
U1	NE5532N	NE5532N	1

Tab. 6 Seznam součástek ovládání vstupů vygenerovaný v programu Eagle

2.8 Obvod pomocného napájení pro zesilovač

2.8.1 Popis a zapojení

Tento modul slouží pro stabilizaci napájecího napětí pro moduly, které obsahují operační zesilovače. Pro použité OZ typu NE5532 je doporučeno napájecího napětí max. $\pm 22V$. Zvolil jsem tedy napětí nižší, aby se předešlo destrukci polovodičů v případě přepětí, ale vyšší než obvyklých $\pm 15V$ pro dosažení větší rezervy pro přebuzení a to $\pm 18V$.

Rezistory R1, R2 mají ochranou funkci, aby po zapnutí nebyl můstek příliš proudově přetěžován nabíjecími se kondenzátory C6, C7. Dále jsou zde připojeny stabilizátory typu 7818T a 7918T, které zajišťují výstupní napětí $\pm 18V$ a jelikož je na nich úbytek cca 6V mělo by výstupní napětí mít téměř nulové zvlnění. Stabilizátory obsahují vnitřní pojistku na 1A, tudíž by nemělo dojít k jeho přetížení.

Druhá část obvodu obsahuje dvoucestný usměrňovač a výstupní napětí je tedy nesymetrické. Po filtraci kondenzátorem C5 je napětí stabilizováno Zenerovou diodou (pouze v případě přepětí) a vyvedeno na konektor X3. Toto napětí je pro napájení vstupních relé, která přepínají vstupy. Napětí 24V je dále stabilizováno pomocí parametrického stabilizátoru s Darlingtonovým tranzistorem na napětí cca 9V viz. (2.8), které je vyvedeno pro ovládání. Na desce ovládání je pak stabilizováno na 5V.

Deska je uspořádána tak, že rozlité měď na horní straně desky slouží zároveň jako chladič. Chladicí plocha pro stabilizátory IC1 a IC2 je malá, protože se nepočítá s velkým odebíraným výkonem a stabilizátory obsahují teplotní pojistku. Plocha chladicí tranzistor Q1 zabírá většinu desky, jelikož na stabilizátoru je velký úbytek napětí, i přes to by se tranzistor neměl přehřívat jelikož příkon mikroprocesorového ovládání by měl být maximálně 20 – 30 mA.

Výpočty některých částí :

$$R_4 = \frac{U_{\max} - U_{\text{Stab1}}}{I_{\max}} = \frac{29 - 24}{50m} = 100\Omega \quad (2.6)$$

$U_{\max}$... maximální přípustné napětí na vstupu

$I_{\max}$... maximální proud, který ZD snese trvale (BZX85 - 1,3W)

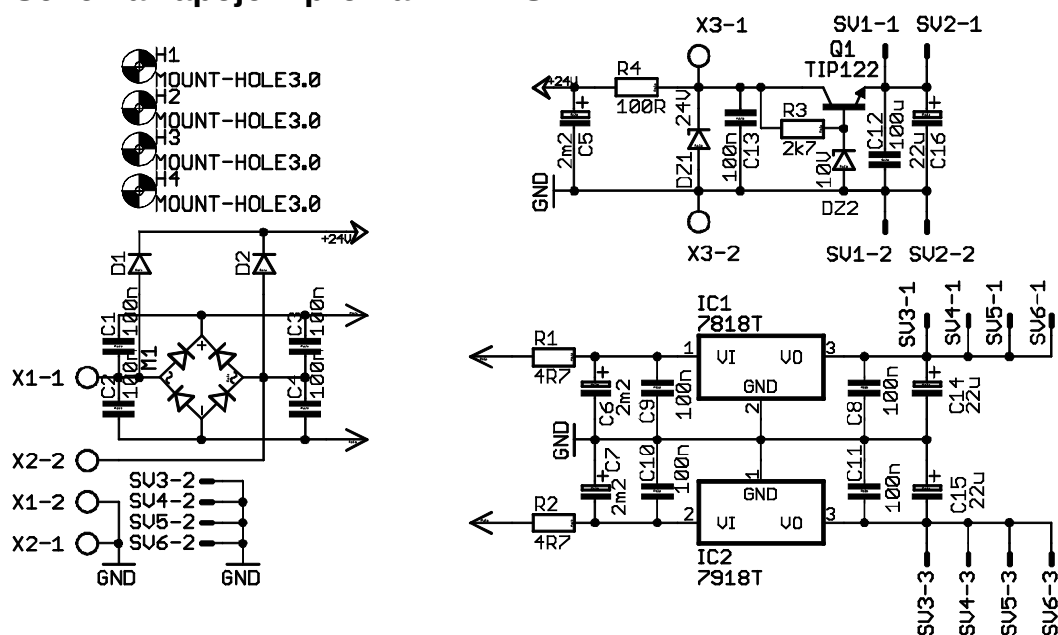
$$R_3 = \frac{U_{\max} - U_{\text{Stab2}}}{I_{\text{stab}}} = \frac{24 - 10}{5m} = 2,7k\Omega \quad (2.7)$$

$$U_{\text{SV1}} = U_{\text{DZ2}} - U_{\text{BEQ1}} = 10 - 1,2 = 8,8V \quad (2.8)$$

$$P_{\text{ztrQ1}} = I_{\text{sv1}}(U_{\text{stab2}} - U_{\text{SV1}}) = 200m \cdot (24 - 8,8) = 3,04W \quad (2.9)$$

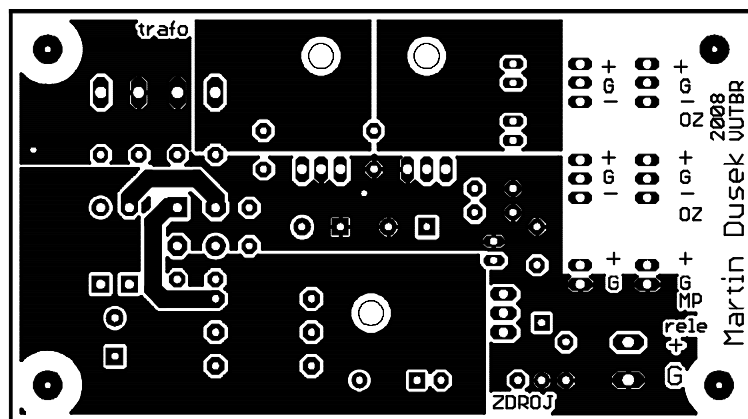
Vzorec (2.9) je maximální ztrátový výkon, který bude měděná plocha chladit. Tento výkon má oproti předpokládanému příkonu ovládání cca 170mA rezervu pro případné další proudově nenáročné zařízení.

2.8.2 Schéma zapojení pro návrh DPS

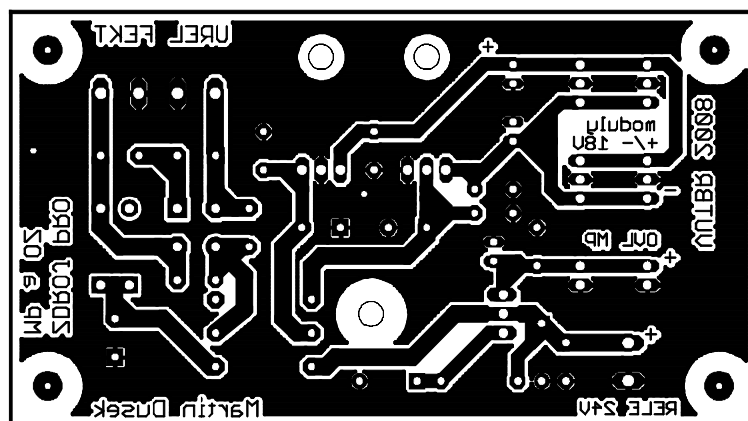


Obr. 2.41 Schéma zapojení desky pomocného napájecího zdroje

2.8.3 Deska plošných spojů

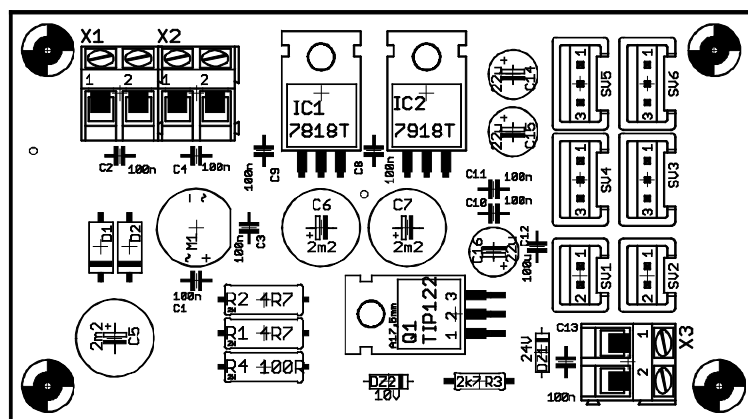


Obr. 2.42 Vrchní strana desky pomocného napájecího zdroje



Obr. 2.43 Spodní strana desky pomocného napájecího zdroje

2.8.4 Osazovací výkres



Obr. 2.44 Osazovací výkres desky pomocného napájecího zdroje

2.8.5 Seznam součástek

Název	Hodnota	Součástka	Počet
C1, C2, C3, C4, C8, C9, C10, C11, C13	100n	C-5	9
C12	100u	C-5	1
C14, C15, C16	22u	C-EL_2,5	3
C5, C6, C7	2m2	C-EL_5	3
D1, D2	1N4007	1N4007	2
DZ1	24V	BZX85V??	1
DZ2	10V	BZX85V??	1
IC1	7818T	7818T	1
IC2	7918T	7918T	1
M1	B380C1500	B380C1500	1
Q1	TIP122	BD303	1
R1, R2	4R7	R- 2W	2
R3	2k7	R-10	1
R4	100R	R- 2W	1

Tab. 7 Seznam součástek pomocného napájecího zdroje vygenerovaný v programu Eagle

2.9 Obvod softstartu

2.9.1 Popis a zapojení

Modul softstartu slouží pro zmenšení proudového nárazu při zapnutí přístroje. Protože jsou všechny elektrolytické kondenzátory vybité a v celém přístroji je jejich celková kapacita značná, byl by jejich nabíjecí proud řádově v desítkách ampér, dle tvrdosti transformátoru. Tento náraz se transformuje do sítě, kde zapnutí může vyhodit i 10A jistič.

Modul obsahuje NTC termistor, který mění dle teploty svůj odpor. V případě zapnutí má odpor největší a jelikož je v sérii s transformátorem, úbytek na něm způsobí pomalejší náběh zdrojů, což ochrání pojistky i kondenzátory, kterým se mohou vlivem velkého nabíjecího proudu upálit přívody. Úbytkem napětí v termistoru a procházejícím proudem se v termistoru uvolňuje teplo, které odpor snižuje.

Aby nebyl termistor příliš namáhán, je v modulu jednoduchý obvod, který po určitém čase (1,2s v závislosti na velikosti R_3 , C_2) sepne relé, které přemostí termistor a na transformátoru je poté celé síťové napětí.

Výpočty některých částí :

$$U_{C2} = U_{nap} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_3 C_2}}) \quad (2.10)$$

$$U_{C2} = U_{DZ1} + U_{be} = 12 + 0,6 = 12,6V \quad (2.11)$$

$$t = R_3 C_2 \cdot \ln\left(1 - \frac{U_{C2}}{U_{nap}}\right) = 100k \cdot 15\mu \cdot \ln\left(1 - \frac{12,6}{24}\right) = 1,12s \quad (2.12)$$

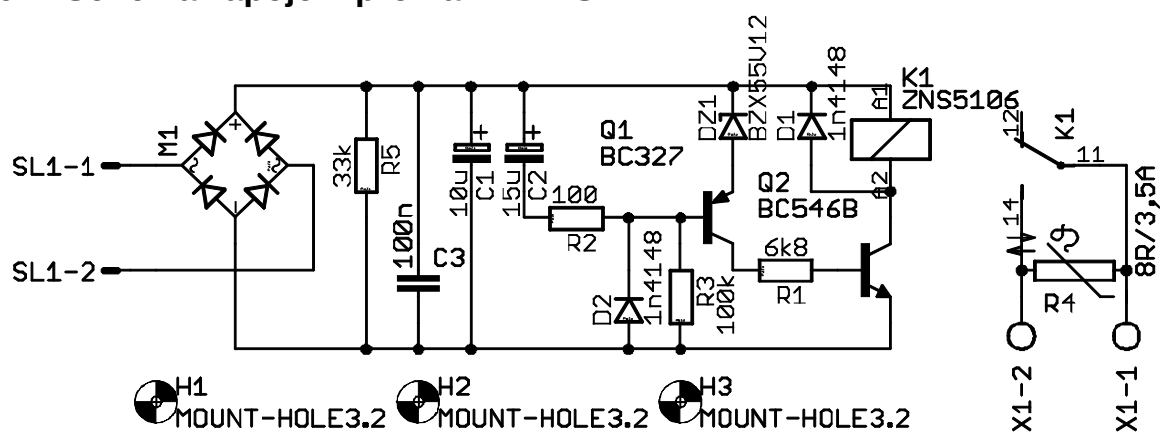
$$R_1 = \frac{U_{nap} - U_{DZ1} - U_{BEt2} - U_{CEt1}}{I_B} = \frac{24 - 12 - 0,6 - 1}{1,5mA} = 6,93k\Omega \Rightarrow 6k8 \quad (2.13)$$

U_{nap} ... stejnosměrné napájecí napětí modulu

t ... zpoždění připojení zátěže

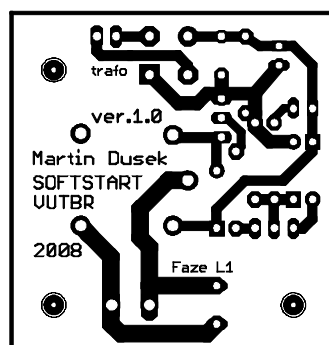
I_B ... proud báze (v saturaci)

2.9.2 Schéma zapojení pro návrh DPS



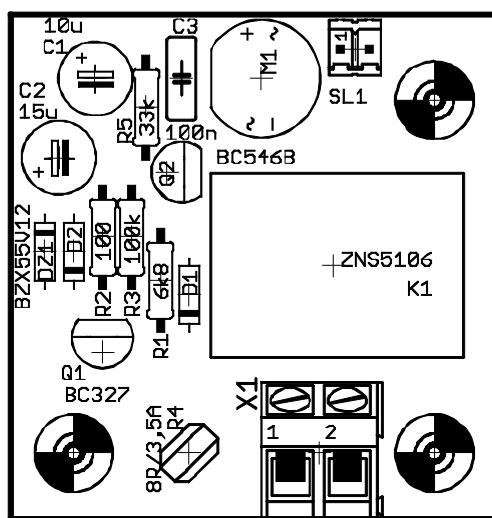
Obr. 2.45 Schéma zapojení desky softstartu

2.9.3 Deska plošných spojů



Obr. 2.46 Spodní strana desky softstartu

2.9.4 Osazovací výkres



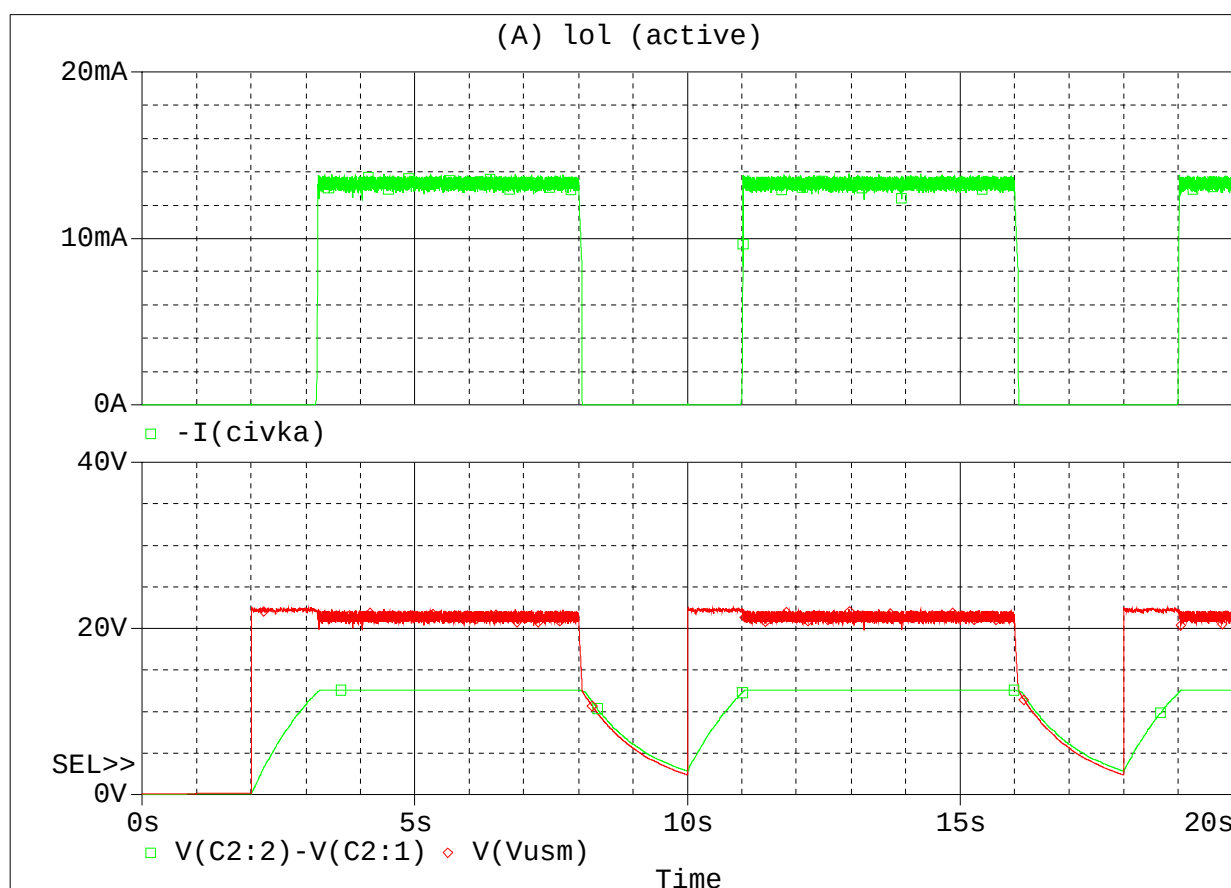
Obr. 2.47 Osazovací výkres desky softstartu (1,5:1)

2.9.5 Seznam součástek

Název	Hodnota	Součástka	Počet
C1	100u/35V	C-EL 2,5	1
C2	15u/35V	C-EL 2,5	1
C3	100n	C5/2.5	1
D1, D2	1n4148	1N4148	2
DZ1	BZX83V12	BZX83V12	1
K1	RAS2415	Relé (1U)	1
M1	B250C1500	můstek	1
Q1	BC327	BC327	1
Q2	BC546B	BC546B	1
R1	6k8	R-10	1
R2	100R	R-10	1
R3	100k	R-10	1
R4	8R/3,5A	Termistor NTC	1
R5	10k	R-10	1
SL1	M02S	konektor	1
X1	AK300/2	svorkovnice	1

Tab. 8 Seznam součástek pomocného napájecího zdroje vygenerovaný v programu Eagle

2.9.6 Výsledek simulace



Obr. 2.48 Přechodové děje v softstartu po zapnutí a vypnutí přístroje

3 Mechanické a konstrukční řešení

3.1 Transformátor

Výpočet parametrů transformátoru:

Výpočet napětí a proudů koncového zesilovače, dle [12]:

$$U = \sqrt{8 \cdot P_{out} \cdot R_z} + 2U_{zb} = \sqrt{8 \cdot 250 \cdot 4} + 2 \cdot 10 = 109,5V \quad (3.1)$$

U_{zb} jsem zvolil přibližně dle simulací

Pro symetrické napájení bude tedy napětí větve poloviční tj. $U_{ss} = U/2 = 55V$

Pro napětí U_{tr} volíme rezervu cca 5÷10% pro ztráty na usměrňovači a vinutí.

$$U_{vinutí} = \frac{1,1 \cdot U_{ss}}{\sqrt{2}} = \frac{1,1 \cdot 55}{\sqrt{2}} = 42,7V \quad (3.2)$$

$$I_{stř} = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot P}{R_z}}}{\pi} = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot 250}{4}}}{\pi} = 3,56A \quad (3.3)$$

Proud transformátoru bude v případě dvou koncových stupňů dvojnásobný.

Pomocná vinutí, pro jednu větev:

$$U_{vinutí2} = \frac{U_{rele}}{\sqrt{2}} = \frac{24}{\sqrt{2}} = 17V \quad (3.4)$$

S dostatečnou rezervou volíme $I_{stř2} = 0,5A$

Transformátor, sekundární vinutí:

2 x 43V/7A

2 x 17V/0,5A

Výkon transformátoru:

$$S = 2 \cdot U_{vinutí} \cdot I_{stř} + 2 \cdot U_{vinutí2} \cdot I_{stř2} = 2 \cdot 43 \cdot 7 + 2 \cdot 17 \cdot 0,5 = 619VA \quad (3.5)$$

3.2 Chlazení

Výpočet tepla, ztrácejícího se na tranzistorech:

Výkon koncového stupně: $P_1 = 250W$

Příkon koncového stupně: $P_2 = U \cdot I_{str} = 109,5 \cdot 3,56 = 389W$ (3.6)

Účinnost koncového stupně: $\eta = \frac{P_1}{P_2} \cdot 100 = \frac{250}{389} \cdot 100 = 64,3\%$ (3.7)

Ztrátový výkon: $P_1 = 389 - 250 = 139W$ – výpočet (3.8)
 $P_z = 172W$ – střední hodnota odečtená z PSpice (maximální)

Výpočet chladiče:

Použita hodnota maximálního středního ztrátového výkonu dle programu PSpice.

Max. teplota přechodu: $\nu_j = 150^\circ C$

Max. uvažovaná teplota okolí: $\nu_a = 35^\circ C$

Celkový max. tepelný odpor: $R_v = \frac{\nu_j - \nu_a}{P_z} = \frac{150 - 35}{172} = 0,66K / W$ (3.9)

Tepelný odpor přechodu: $R_{vj} = 0,625^\circ C / W$

Tepelný odpor izolační podložky: $R_{ucs} = 0,6^\circ C / W$ (průměrná hodnota s pastou)

Max. tepel odpor chladiče pro 6 koncových tranzistorů:

$$R_{usa} = R_v - \frac{R_{vj} + R_{ucs}}{6} = 0,66 - \frac{0,625 + 0,6}{6} = 0,46^\circ C / W \quad (3.10)$$

Max. tepel odpor chladiče pro 4 koncové tranzistory:

$$R_{usa} = R_v - \frac{R_{ucs} + R_{ucs}}{4} = 0,66 - \frac{0,625 + 0,6}{4} = 0,35^\circ C / W \quad (3.11)$$

Pro maximální oteplení $60^\circ C$ je tepelný odpor chladiče:

$$R_{usa} = \frac{\nu_{sa} - \nu_a}{P_z} = \frac{60 - 35}{172} = 0,15K / W \quad (3.12)$$

Zvolíme-li chladič $R_{usa} = 0,15^\circ C / W$, vyhoví pro daný výkon zesilovače zapojení s čtyřmi koncovými tranzistory. Pro zvýšení bezpečnosti bude lepší použít variantu s šesti výkonovými prvky na kanál.

Maximální oteplení jádra výkonového prvku bude při použití tohoto chladiče tedy:

Pro 4 koncové tranzistory:

$$\nu_j = \nu_a + (R_{vj} + R_{ucs}) \cdot \frac{P_z}{4} = 35 + (0,625 + 0,6) \frac{172}{4} = 87,7^\circ C \quad (3.13)$$

Pro 6 koncových tranzistorů:

$$\nu_j = \nu_a + (R_{vj} + R_{ucs}) \cdot \frac{P_z}{6} = 35 + (0,625 + 0,6) \frac{172}{6} = 70,8^\circ C \quad (3.14)$$

Dle těchto výpočtů s přihlédnutím na rozumnou velikost zařízení, jsem zvolil na každý kanál zesilovače dva chladiče typu ZH-2650 (ALUPA). Velikost jednoho dílu chladiče je 167x160x48.

3.3 Přístrojová skříň

3.3.1 Řešení přístrojové skříně

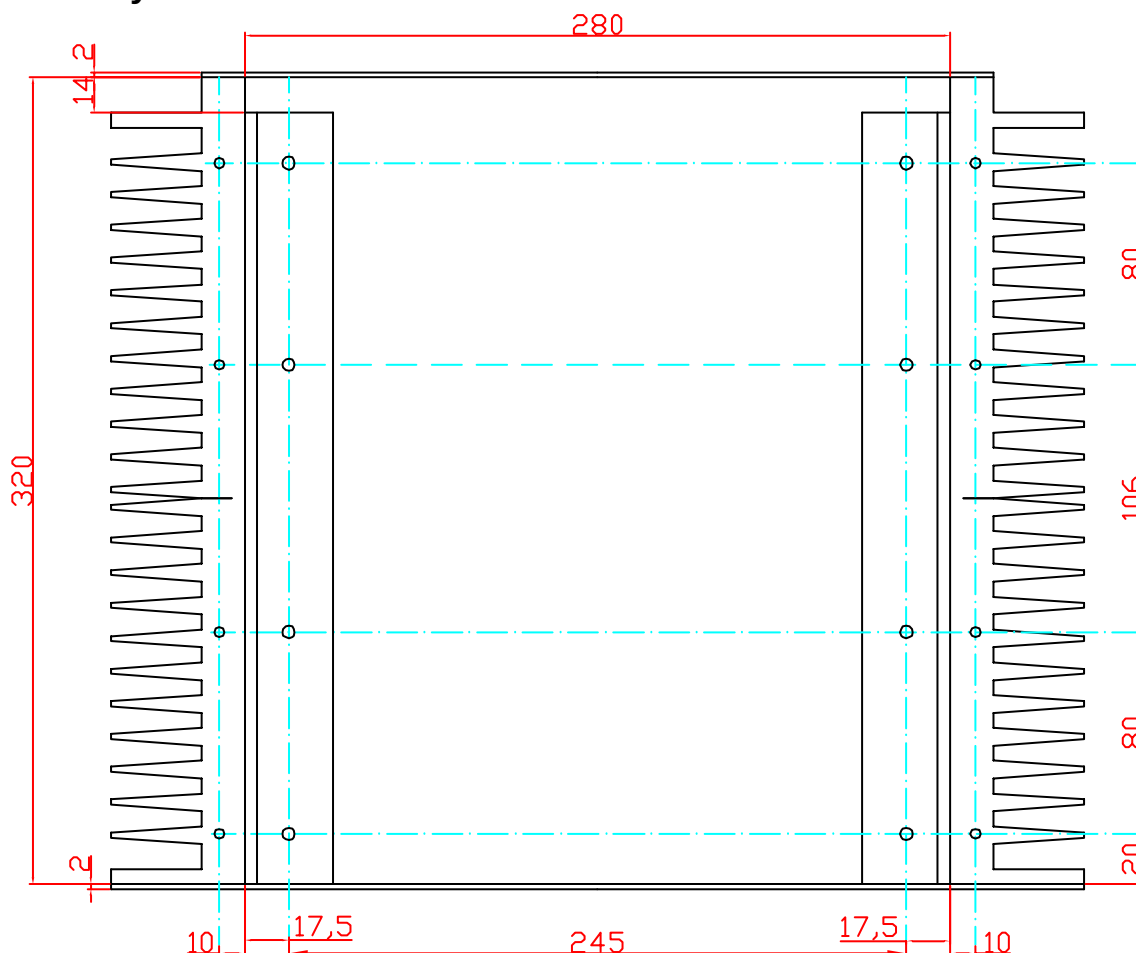
Jelikož žebrování chladičů má výšku 160mm, nepodařilo se mi najít v nabídkách různých firem vhodnou skříň. Většinou se zesilovače vkládají do normovaných skříní zvaných „RACK“, které se dělí dle velikosti na 1U až 3U, ale žádná z nich nebyla dostatečně velká. Rozhodl jsem se tedy skříň vyrobit.

Hlavní nosná část jsou chladiče, které jsou pomocí plochého drátu a L-profilu připevněny po dvojicích k sobě. L profil je připevněn ke dnu tvořenému 5mm Textitem (Gumoid), který je nosný pro transformátor a desky plošných spojů. Přední a zadní panel jsou přišroubovány do chladičů, stejně tak i vrchní víko. Tuto konstrukci jsem volil zejména pro její jednoduchost při zpracování a nevyžaduje žádného zvláštního nářadí (pouze nůžky na plech).

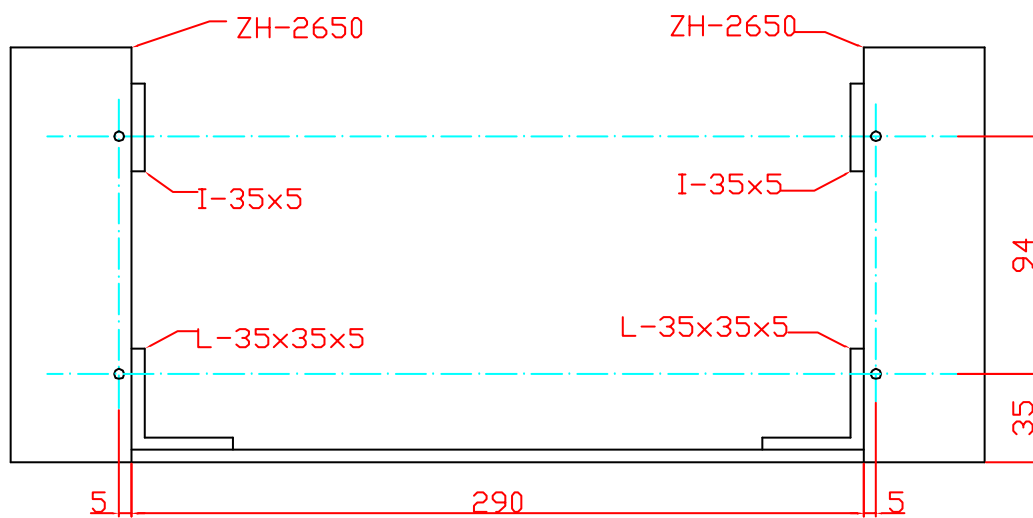
Výkres předního a zadního panelu jsou kótovány podrobně (pro vrtání), zatímco celkový pohled má okótovány pouze hlavní rozměry a díry pro vrtání. U profilů je napsáno pouze jejich číslo v katalogu firmy „ALUPA“ (www.alupa.cz), kde pomocí čísla lze zjistit podrobnosti.

Chladiče u předního panelu jsou frézovány tak, aby přední panel dosedl na první (rovné) žebro. Dále jsou strženy a zakulaceny hrany žeber, jelikož v původním provedení by se o ostré hrany mohl uživatel poranit.

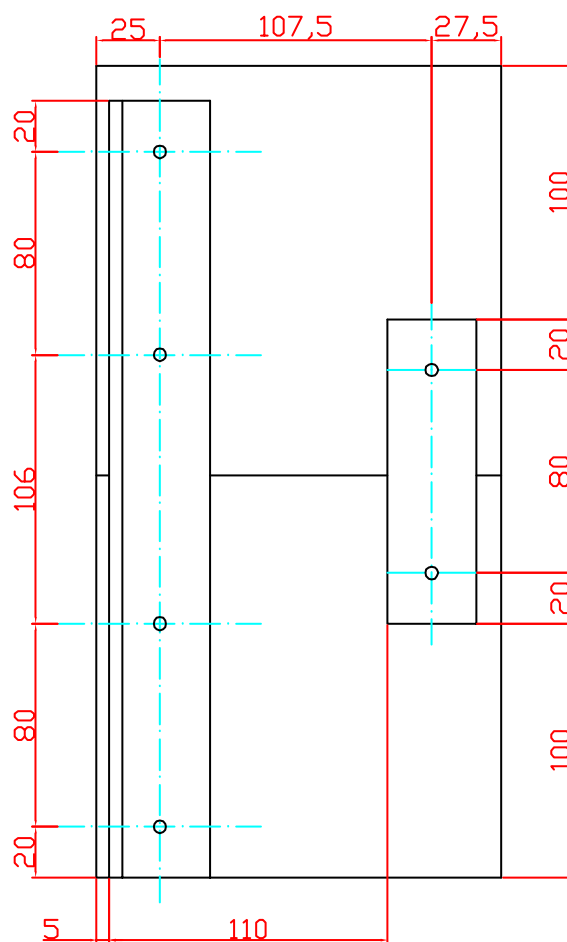
3.3.2 Výkres skříně



Obr. 3.1 Pohled na přístrojovou skříň shora v měřítku 3:1

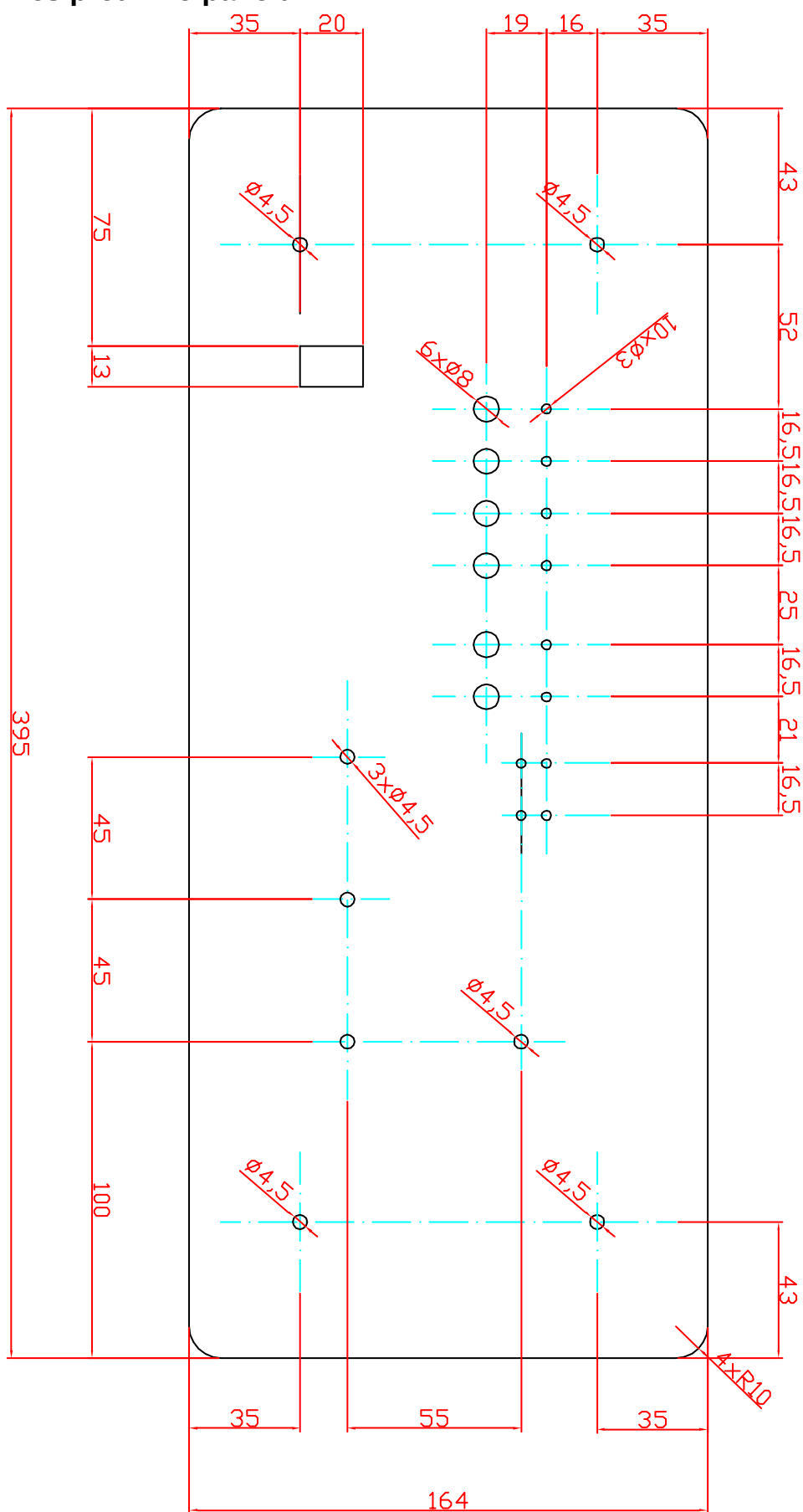


Obr. 3.2 Pohled na přístrojovou skříň zepředu v měřítku 3:1



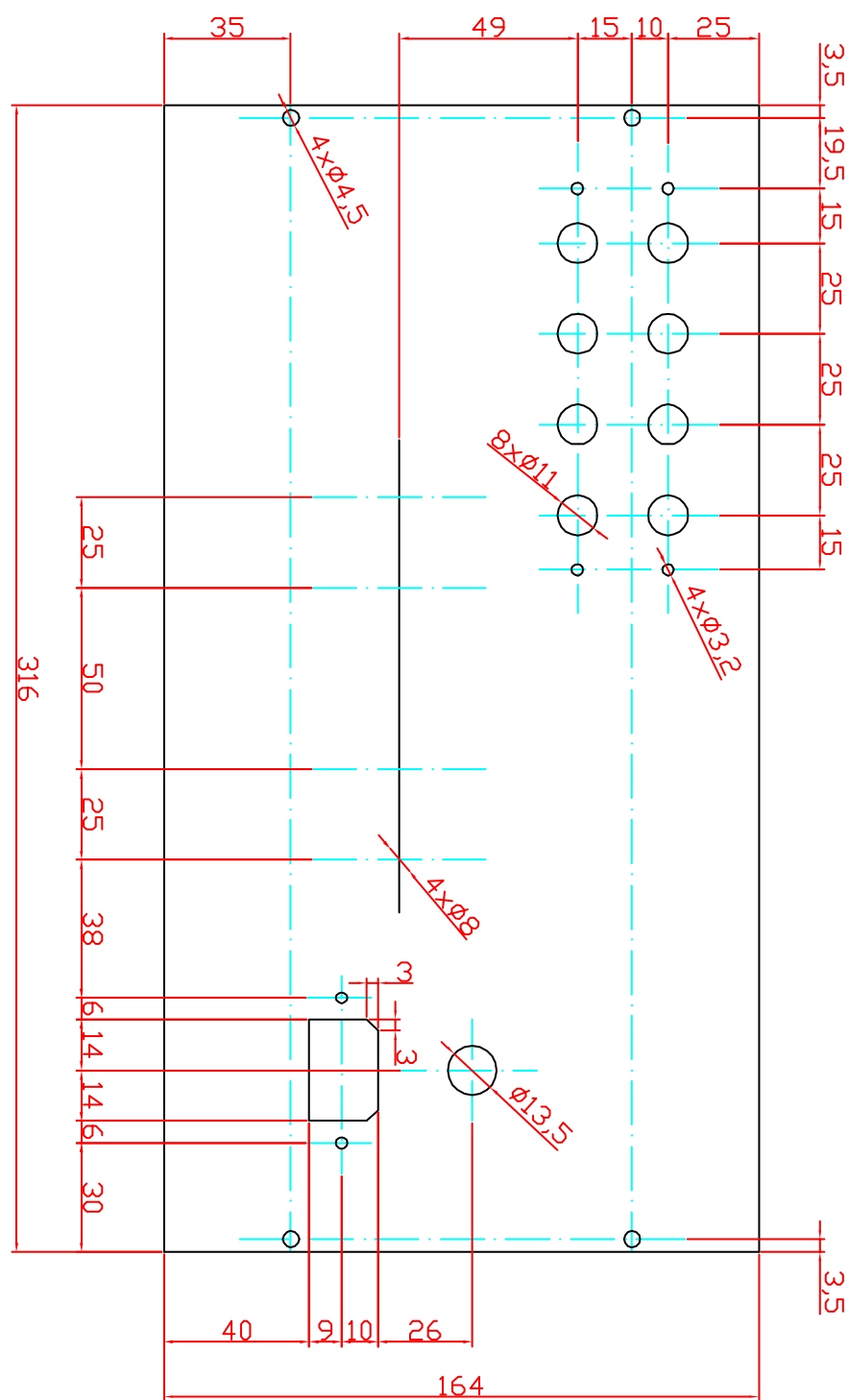
Obr. 3.3 Pohled na přípevnění profilů na chladič v měřítku 3:1

3.3.3 Výkres předního panelu



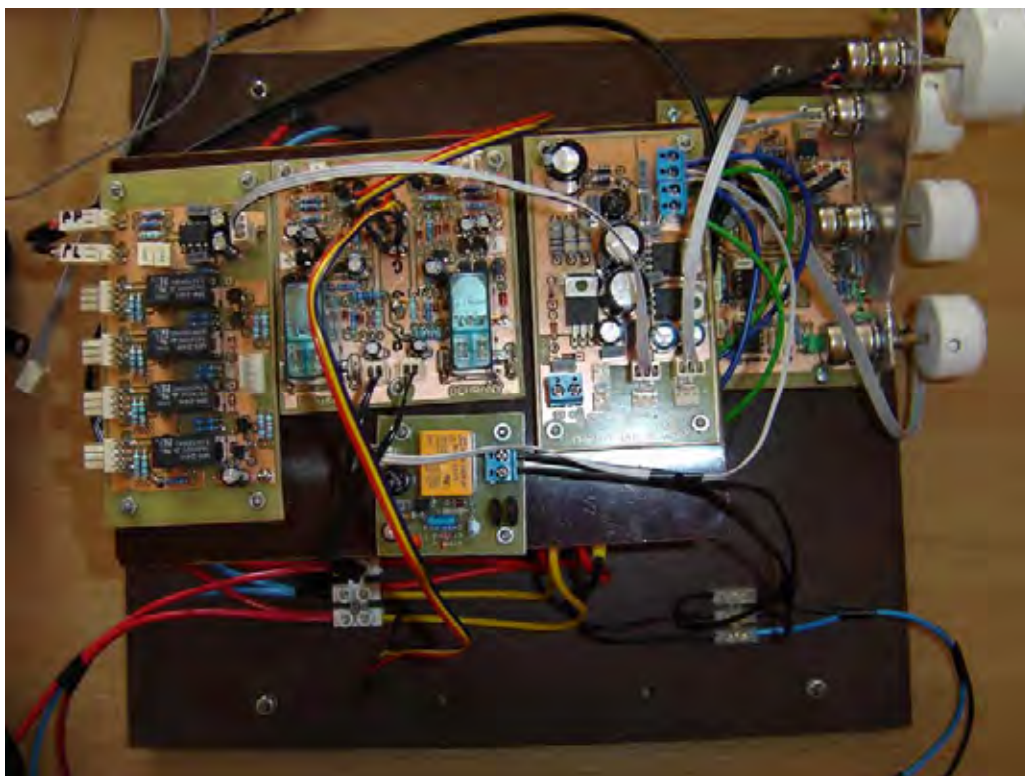
obr. 3.4 Výkres předního panelu v měřítku 1:2

3.3.4 Výkres zadního panelu

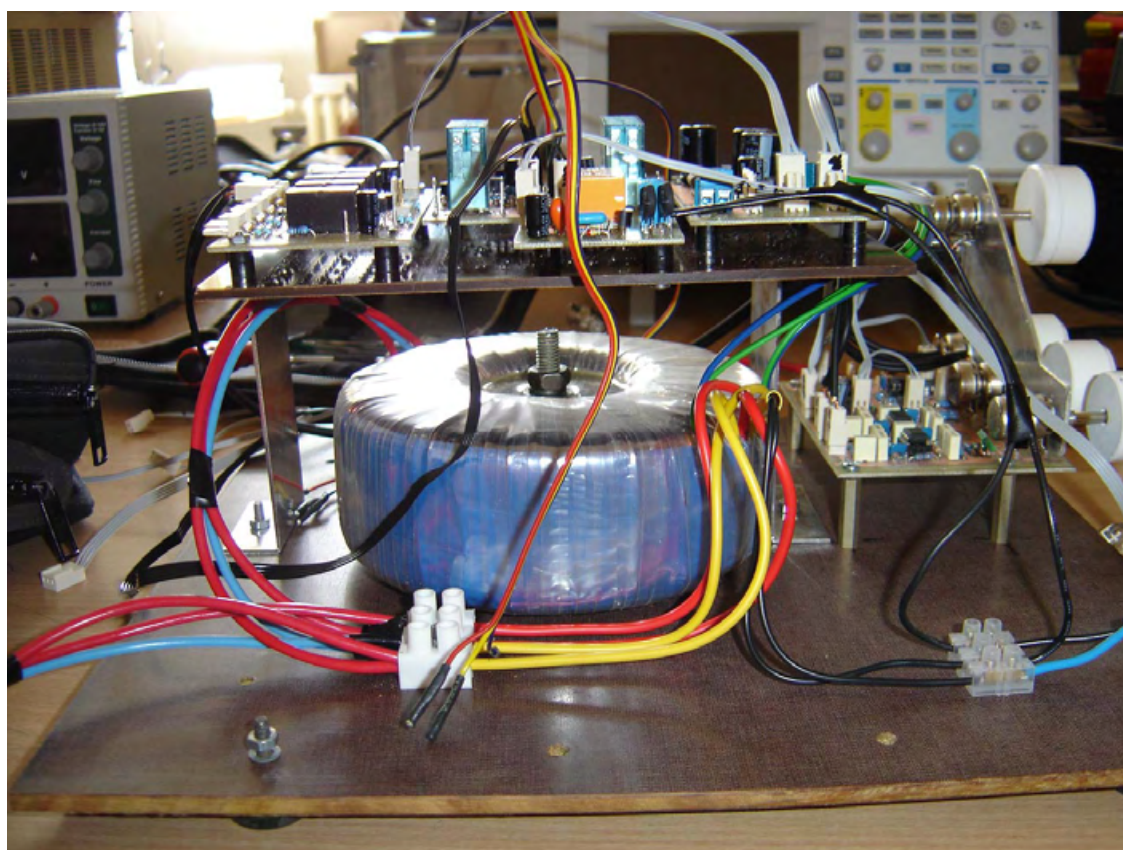


Obr. 3.5 Výkres zadního panelu v měřítku 1:2

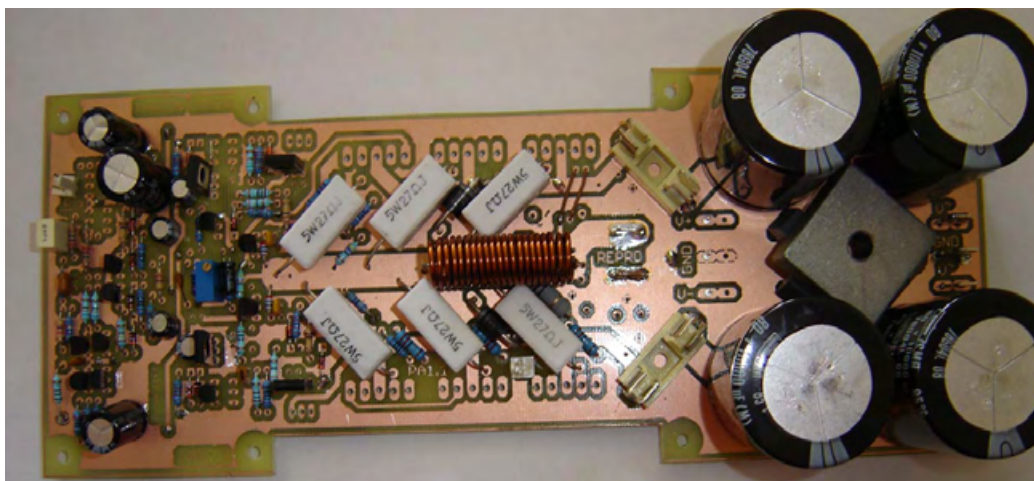
3.4 Fotky realizace



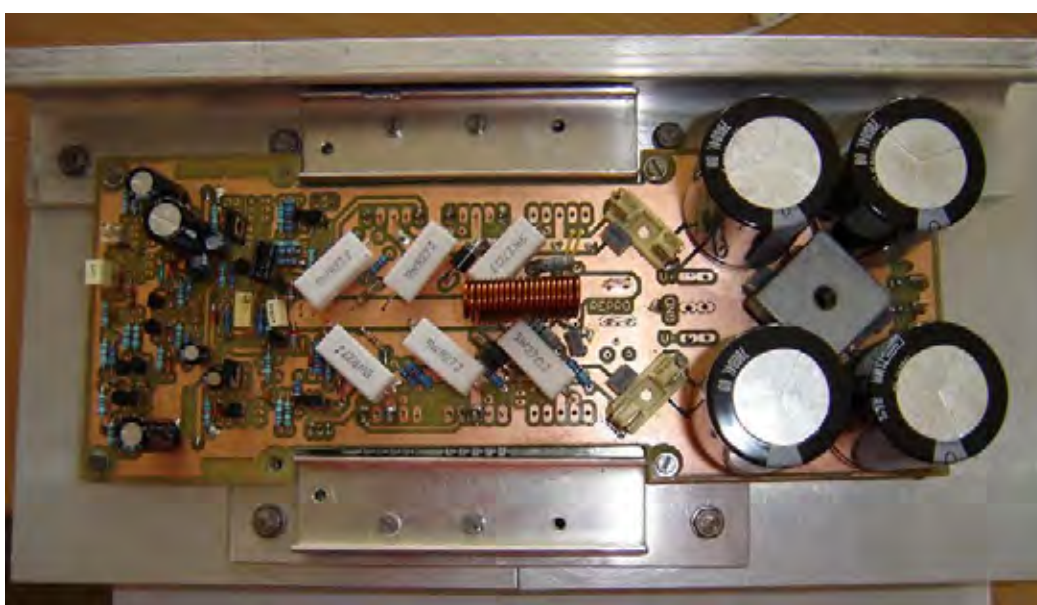
Obr. 3.6 Uspořádání modulů na nosné desce



Obr. 3.7 Umístění transformátoru na nosné desce



Obr. 3.8 Deska koncového stupně – bez koncových tranzistorů



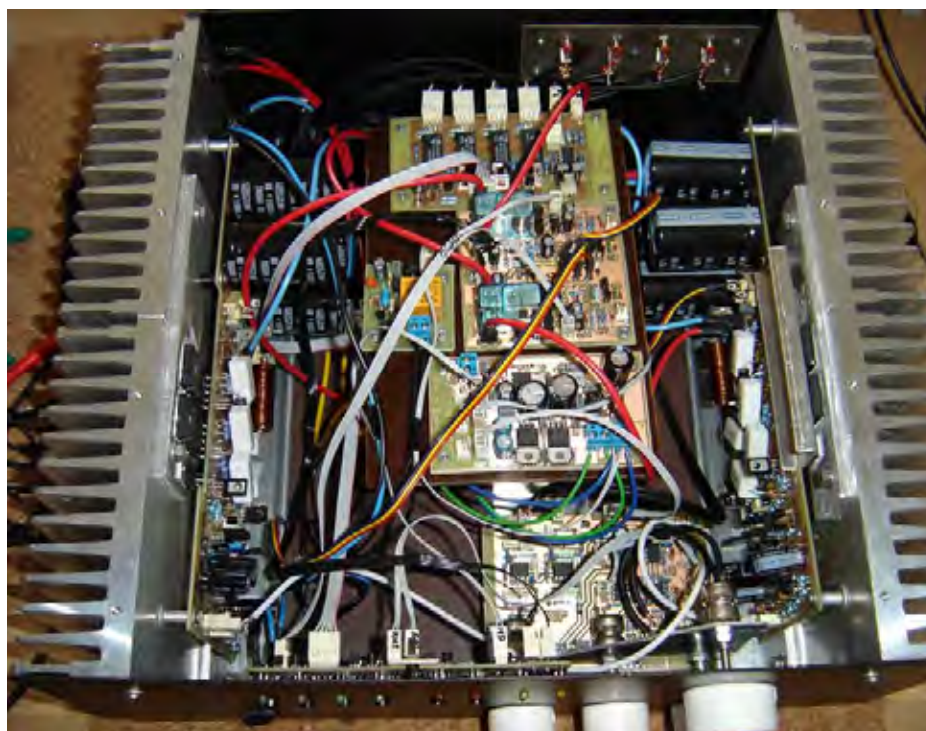
Obr. 3.9 Deska koncového stupně umístěná na chladiči (pohled shora)



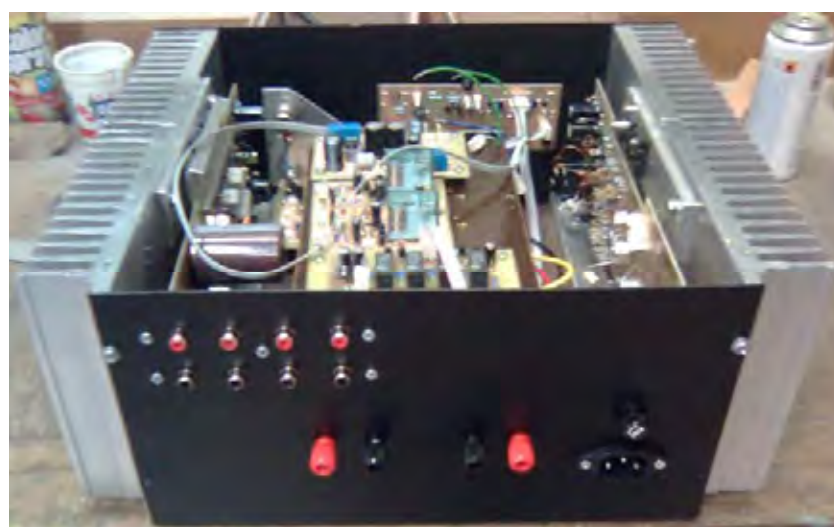
Obr. 3.10 Deska koncového stupně umístěná na chladiči (boční pohled)



Obr. 3.11 Pohled na zesilovač přední panel



Obr. 3.12 Pohled na zesilovač shora



Obr. 3.13 Pohled na zesilovač zadní panel

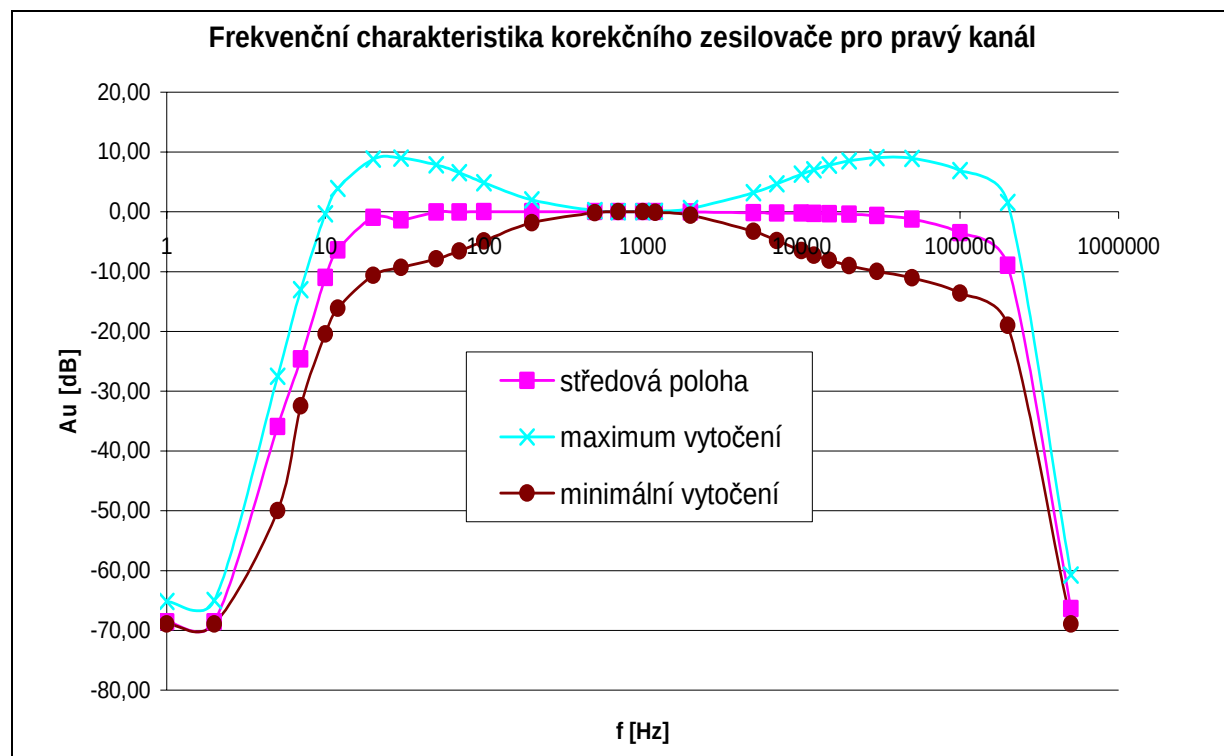
4 Výsledky měření realizovaného vzorku

4.1 Korekční předzesilovač

4.1.1 Frekvenční charakteristika

levý kanál										
f [Hz]	1	2	5	7	10	12	20	30	50	70
U [mV]	0,28	0,28	12,00	44,00	212,00	359,00	673,00	640,00	747,00	749,00
Au [dB]	-68,56	-68,56	-35,92	-24,63	-10,97	-6,40	-0,94	-1,38	-0,03	-0,01
U [mV]	0,43	0,44	33,00	175,00	752,00	1227,00	2153,00	2206,00	1926,00	1658,00
Au [dB]	-65,19	-65,00	-27,49	-13,00	-0,34	3,91	8,80	9,01	7,83	6,53
U [mV]	0,26	0,26	2,30	17,30	69,10	113,80	213,30	247,90	293,50	341,90
Au [dB]	-68,92	-68,92	-49,99	-32,46	-20,43	-16,10	-10,64	-9,33	-7,87	-6,54
f [Hz]	100	200	500	700	1000	1200	2000	5000	7000	10000
U [mV]	750,30	752,10	752,60	752,00	750,00	749,70	745,50	736,10	733,00	729,30
Au [dB]	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00	-0,05	-0,16	-0,20	-0,24
U [mV]	1374,00	981,00	799,00	783,00	782,00	788,00	834,00	1129,00	1342,00	1614,00
Au [dB]	4,90	1,97	0,19	0,01	0,00	0,07	0,56	3,19	4,69	6,29
U [mV]	412,90	587,80	711,50	725,80	726,10	720,50	679,00	498,90	417,90	344,90
Au [dB]	-4,90	-1,84	-0,18	0,00	0,00	-0,07	-0,58	-3,26	-4,80	-6,47
f [Hz]	12000	15000	20000	30000	50000	100000	200000	500000		
U [mV]	726,90	723,10	715,80	697,60	649,30	500,10	268,60	0,36	středová poloha	
Au [dB]	-0,27	-0,32	-0,41	-0,63	-1,25	-3,52	-8,92	-66,38		
U [mV]	1757,00	1919,00	2087,00	2217,00	2186,00	1730,00	935,00	0,72	maximum vytočení	
Au [dB]	7,03	7,80	8,53	9,05	8,93	6,90	1,55	-60,72		
U [mV]	315,10	285,60	257,50	230,50	203,50	152,00	81,30	0,26	minimální vytočení	
Au [dB]	-7,25	-8,10	-9,00	-9,97	-11,05	-13,58	-19,02	-68,92		

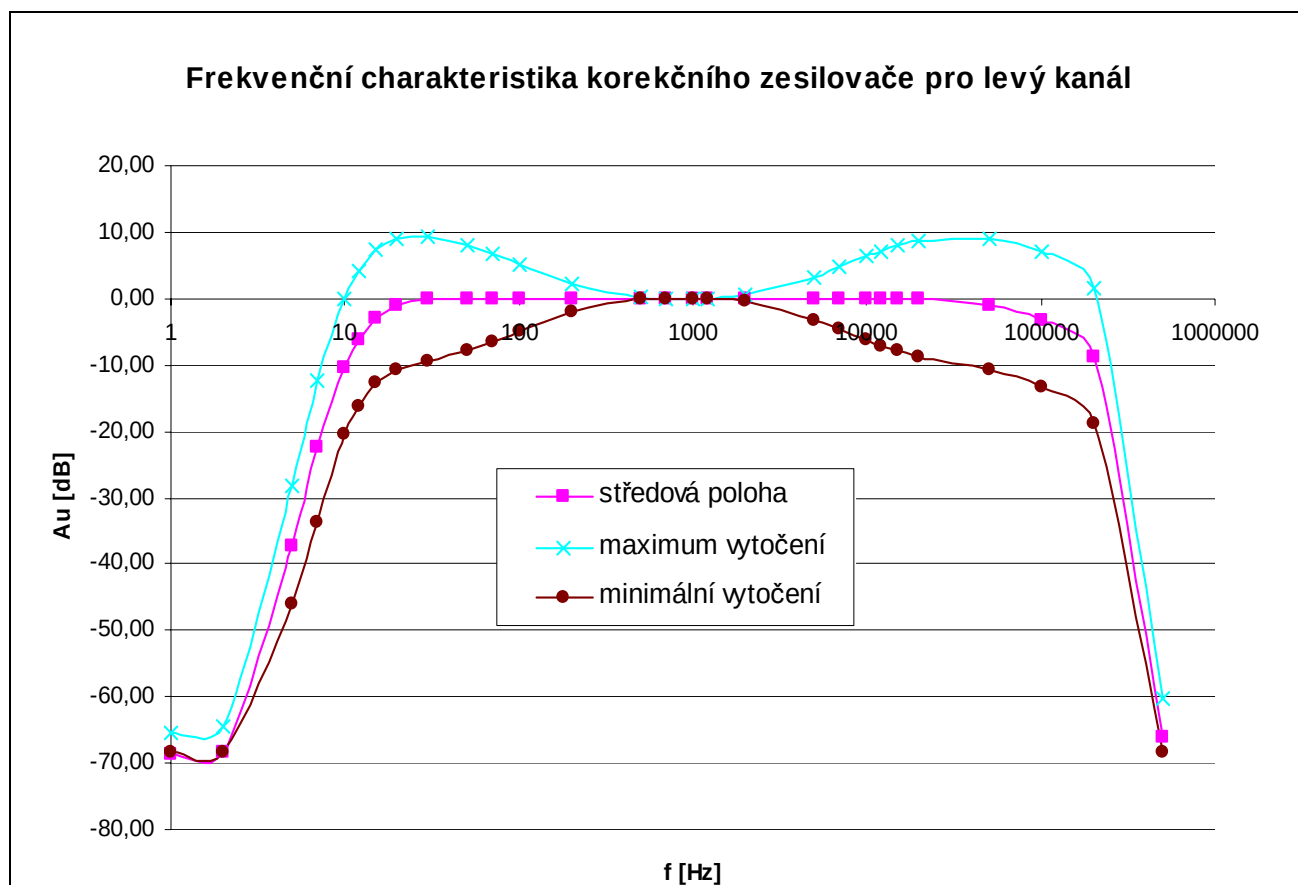
Tab. 9 Frekvenční charakteristika pro levý kanál korekčního předzesilovače



Graf 1 Frekvenční charakteristika pro levý kanál korekčního předzesilovače

pravý kanál										
f [Hz]	1	2	5	7	10	12	15	20	30	50
U [mV]	0,28	0,29	10,10	57,00	225,00	368,00	536,00	678,00	733,10	746,80
Au [dB]	-68,57	-68,26	-37,42	-22,39	-10,47	-6,19	-2,93	-0,88	-0,21	-0,05
U [mV]	0,42	0,47	30,00	185,00	767,00	1247,00	1793,00	2187,00	2244,00	1957,00
Au [dB]	-65,30	-64,33	-28,23	-12,43	-0,07	4,15	7,30	9,03	9,25	8,06
U [mV]	0,27	0,28	3,60	15,00	68,70	111,30	164,10	210,40	245,30	291,10
Au [dB]	-68,51	-68,19	-46,01	-33,62	-20,40	-16,21	-12,83	-10,68	-9,34	-7,86
f [Hz]	70	100	200	500	700	1000	1200	2000	5000	7000
U [mV]	748,00	748,80	749,60	750,20	750,20	750,70	750,90	751,90	753,10	752,20
Au [dB]	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,03	0,02
U [mV]	1682,00	1388,00	982,40	791,80	774,80	773,50	779,10	824,00	1119,00	1332,00
Au [dB]	6,75	5,08	2,08	0,20	0,01	0,00	0,06	0,55	3,21	4,72
U [mV]	339,40	410,10	573,80	704,20	718,40	719,20	713,90	675,70	500,90	421,10
Au [dB]	-6,52	-4,88	-1,96	-0,18	-0,01	0,00	-0,06	-0,54	-3,14	-4,65
f [Hz]	10000	12000	15000	20000	50000	100000	200000	500000		
U [mV]	749,70	747,70	744,10	736,80	668,10	514,40	277,60	0,37	středová poloha	
Au [dB]	-0,01	-0,03	-0,08	-0,16	-1,01	-3,28	-8,64	-66,15		
U [mV]	1605,00	1749,00	1913,00	2084,00	2181,00	1730,00	940,00	0,75	Maximum vytočení	
Au [dB]	6,34	7,09	7,87	8,61	9,00	6,99	1,69	-60,27		
U [mV]	348,30	318,50	288,90	260,60	205,00	154,70	83,00	0,28	minimální vytočení	
Au [dB]	-6,30	-7,07	-7,92	-8,82	-10,90	-13,35	-18,76	-68,19		

Tab. 10 Frekvenční charakteristika pro pravý kanál korekčního předzesilovače



Graf 2 Frekvenční charakteristika pro pravý kanál korekčního předzesilovače

4.1.2 Vliv zapnutí obvodu pro potlačení korekcí

f [Hz]	10	20	50	70	100	200	500	700	1000
U [mV]	71,00	221,00	304,00	354,00	427,00	599,00	736,00	751,00	751,00
Au [dB]	-20,49	-10,62	-7,86	-6,53	-4,90	-1,96	-0,18	0,00	0,00
U [mV]	222,00	664,00	739,00	743,00	748,00	762,00	773,00	775,20	775,00
Au [dB]	-10,86	-1,34	-0,41	-0,37	-0,31	-0,15	-0,02	0,00	0,00
U [mV]	720,00	2058,00	1840,00	1584,00	1313,00	937,00	763,00	748,00	748,50
Au [dB]	-0,34	8,79	7,81	6,51	4,88	1,95	0,17	-0,01	0,00
U [mV]	228,00	683,50	753,80	751,30	745,90	732,20	721,30	719,90	719,90
Au [dB]	-9,99	-0,45	0,40	0,37	0,31	0,15	0,02	0,00	0,00
f [Hz]	2000	3000	5000	7000	10000	12000	15000	20000	50000
U [mV]	704,00	637,00	517,00	434,00	358,00	328,00	298,00	271,00	226,00
Au [dB]	-0,56	-1,43	-3,24	-4,76	-6,44	-7,20	-8,03	-8,85	-10,43
U [mV]	775,00	772,00	763,00	752,00	735,00	724,00	709,00	689,00	628,00
Au [dB]	0,00	-0,03	-0,14	-0,26	-0,46	-0,59	-0,77	-1,02	-1,83
U [mV]	798,00	881,60	1083,00	1287,00	1549,00	1688,00	1849,00	2023,00	2234,00
Au [dB]	0,56	1,42	3,21	4,71	6,32	7,06	7,85	8,64	9,50
U [mV]	720,20	722,50	728,70	736,00	751,00	760,90	773,00	790,00	800,00
Au [dB]	0,00	0,03	0,11	0,19	0,37	0,48	0,62	0,81	0,92

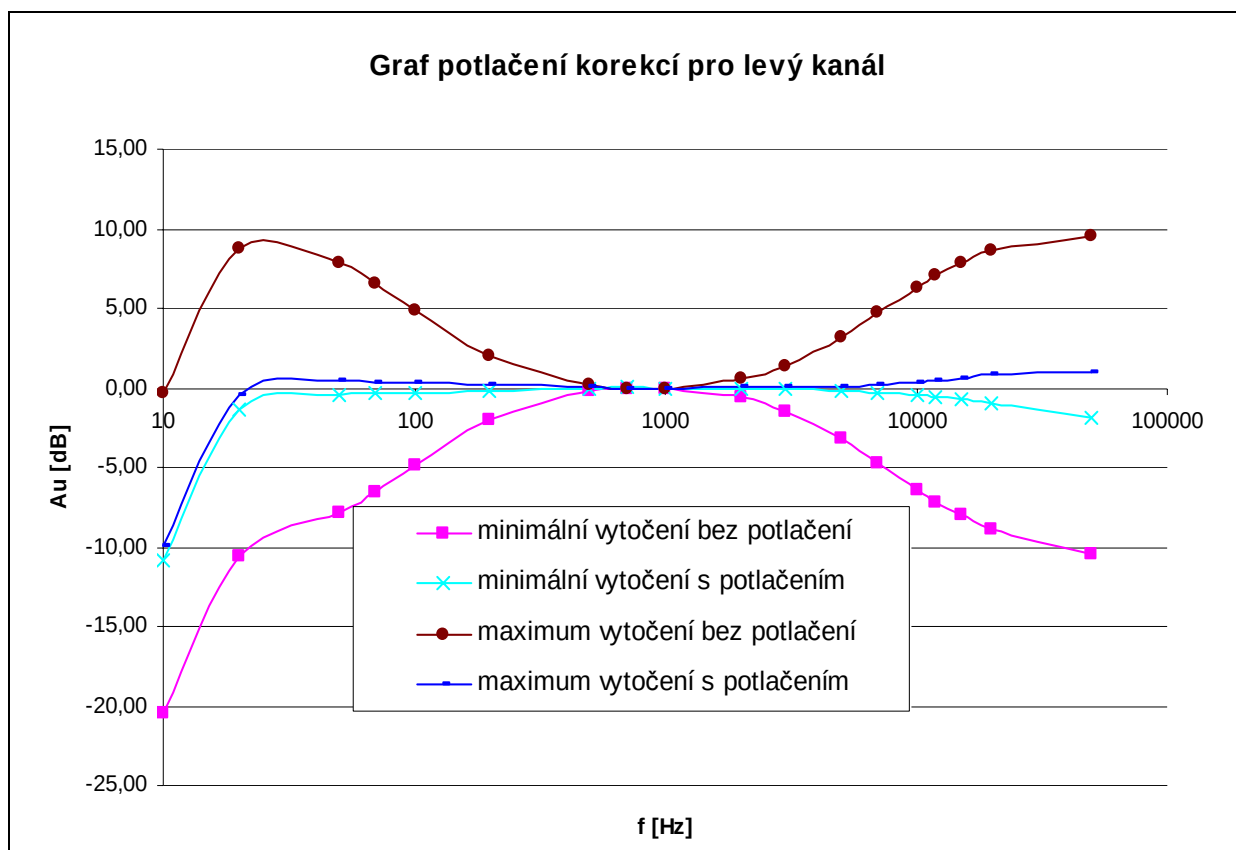
Tab. 11 Vliv zapnutí obvodu potlačení korekcí pro levý kanál

f [Hz]	10	20	50	70	100	200	500	700	1000
U [mV]	66,00	205,00	283,00	330,00	399,00	559,00	686,00	700,00	700,90
Au [dB]	-20,52	-10,68	-7,88	-6,54	-4,89	-1,96	-0,19	-0,01	0,00
U [mV]	214,00	638,00	714,00	718,00	723,00	736,00	747,00	749,00	750,00
Au [dB]	-10,89	-1,40	-0,43	-0,38	-0,32	-0,16	-0,03	-0,01	0,00
U [mV]	745,00	2119,00	1897,00	1630,00	1346,00	952,00	767,00	751,00	749,00
Au [dB]	-0,05	9,03	8,07	6,75	5,09	2,08	0,21	0,02	0,00
U [mV]	238,00	708,00	785,00	783,00	777,80	763,00	751,00	749,00	748,00
Au [dB]	-9,95	-0,48	0,42	0,40	0,34	0,17	0,03	0,01	0,00
f [Hz]	2000	30000	50000	70000	10000	12000	15000	20000	50000
U [mV]	659,00	599,00	489,00	411,00	341,00	312,00	284,40	258,00	216,00
Au [dB]	-0,54	-1,36	-3,13	-4,64	-6,26	-7,03	-7,83	-8,68	-10,22
U [mV]	749,00	746,30	737,00	727,00	710,70	700,00	685,80	666,00	608,00
Au [dB]	-0,01	-0,04	-0,15	-0,27	-0,47	-0,60	-0,78	-1,03	-1,82
U [mV]	799,00	882,00	1086,00	1294,00	1562,00	1705,00	1870,00	2050,00	2272,00
Au [dB]	0,56	1,42	3,23	4,75	6,38	7,14	7,95	8,75	9,64
U [mV]	749,00	741,90	758,00	766,80	781,80	791,90	805,50	822,00	834,00
Au [dB]	0,01	-0,07	0,12	0,22	0,38	0,50	0,64	0,82	0,95

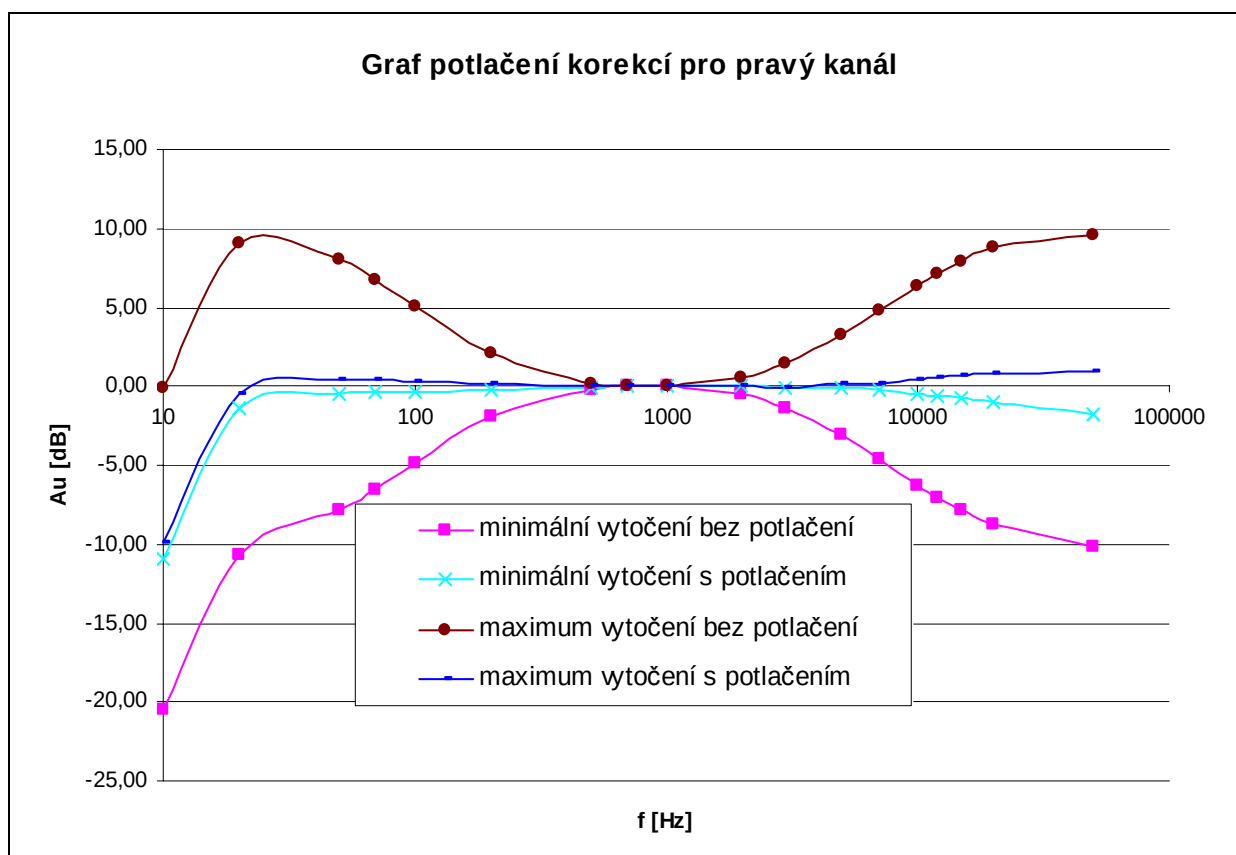
Tab. 12 Vliv zapnutí obvodu potlačení korekcí pro pravý kanál

Legenda: korekce na minimu, potlačení vypnuto
korekce na minimu, potlačení zapnuto - $I_{opt} = 16\text{mA}$
korekce na maximu, potlačení vypnuto
korekce na maximu, potlačení zapnuto - $I_{opt} = 16\text{mA}$

Veškeré hodnoty jsou měřeny pro vstupní napětí $U_{vst} = 0,75\text{V}$ a zesílení $A_u = 1$ pro $f = 1\text{kHz}$.



Graf 3 Vliv zapnutí obvodu potlačení korekcí pro levý kanál

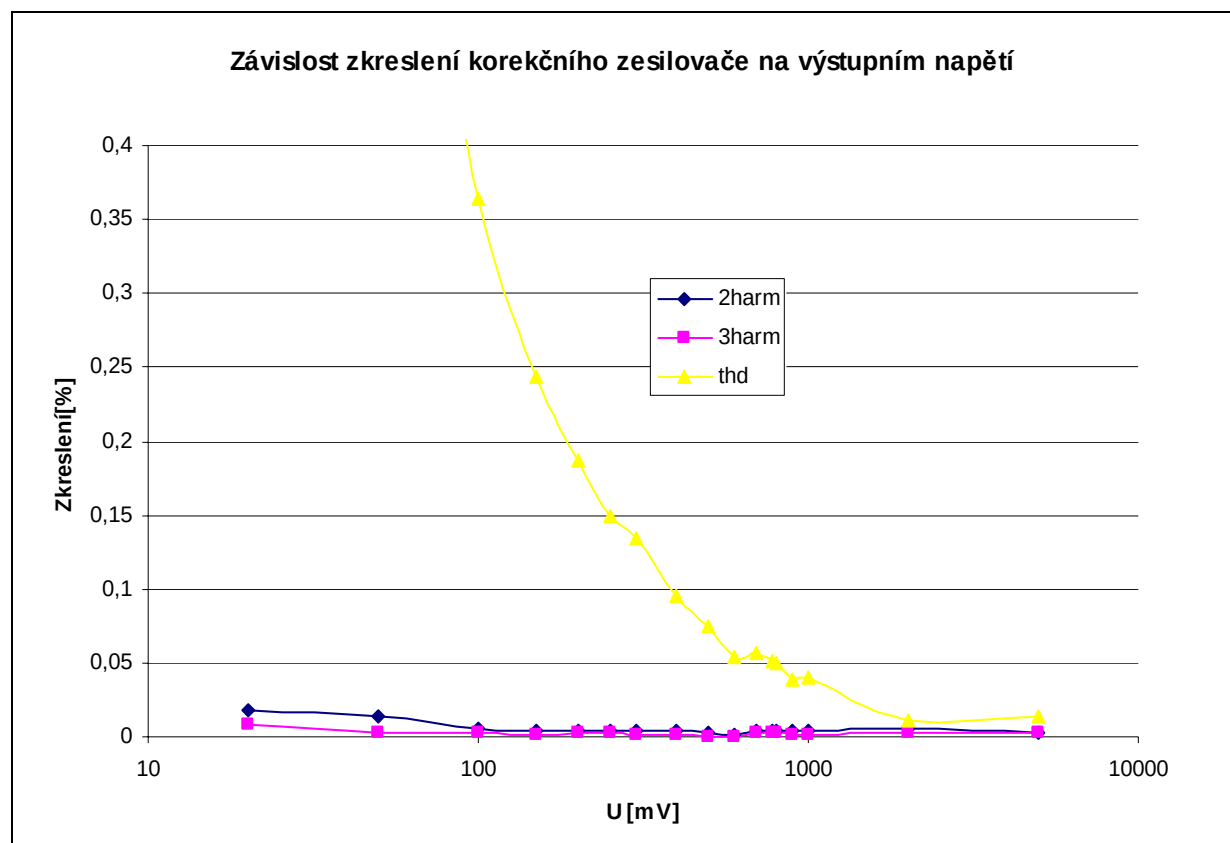


Graf 4 Vliv zapnutí obvodu potlačení korekcí pro pravý kanál

4.1.3 Zkreslení korekčního zesilovače

U [mV]	20	50	100	150	200	250	300	400	500
2.harm [%]	0,018	0,014	0,0055	0,004	0,0048	0,0048	0,0038	0,0036	0,0026
3.harm [%]	0,008	0,0034	0,0023	0,0013	0,0021	0,0022	0,0019	0,0012	0,0006
THD-N [%]	1,673	0,727	0,364	0,243	0,187	0,15	0,134	0,095	0,075
U [mV]	600	700	775	800	900	1000	2000	5000	
2.harm [%]	0,002	0,0047	0,0041	0,0047	0,0043	0,0038	0,0058	0,0027	
3.harm [%]	0,0003	0,0025	0,0022	0,0021	0,002	0,0016	0,0028	0,0022	
THD-N [%]	0,054	0,057	0,051	0,05	0,039	0,04	0,011	0,014	

Tab. 13 Zkreslení korekčního zesilovače v závislosti na výstupním napětí



Graf 5 Zkreslení korekčního zesilovače v závislosti na výstupním napětí

f [Hz]	250	500	1000	2000	4000	8000
THD-N [%]	0,185	0,054	0,031	0,027	0,027	0,026

Tab. 14 Zkreslení korekčního zesilovače v závislosti na frekvenci

4.1.4 Další naměřené hodnoty

Přebuditelnost vstupů:

$$U_{\text{nom}} = 0,775\text{V}$$

$$U_{\text{max}} = 5,35\text{V (před limitací)}$$

$$\text{Přebuditelnost: } 20 \log \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{nom}}} = 20 \log \frac{5,35}{0,775} = 16,8\text{dB}$$

Rychlost přeběhu:

Sestupná hrana: $t = 2\mu\text{s}$ pro $U = 1,125\text{V}$ $\Rightarrow SR = \frac{U[\text{V}]}{t[\mu\text{s}]} = \frac{1,124}{2} = 0,56\text{V} / \mu\text{s}$

Vzestupná hrana: $t = 1,98\mu\text{s}$ pro $U = 1,143\text{V}$ $\Rightarrow SR = \frac{U[\text{V}]}{t[\mu\text{s}]} = \frac{1,143}{1,98} = 0,58\text{V} / \mu\text{s}$

Útlum při zapnutí MUTE:

Kanál	MUTE vypnuto	MUTE zapnuto	Útlum
Levý	$U_{pvM} = 750\text{mV}$	$U_{pzM} = 2,27\text{mV}$	$A = 50,38\text{dB}$
Pravý	$U_{lvM} = 750\text{mV}$	$U_{lzM} = 3,36\text{mV}$	$A = 46,97\text{dB}$

Tab. 15 Útlum po aktivaci MUTE obvodu

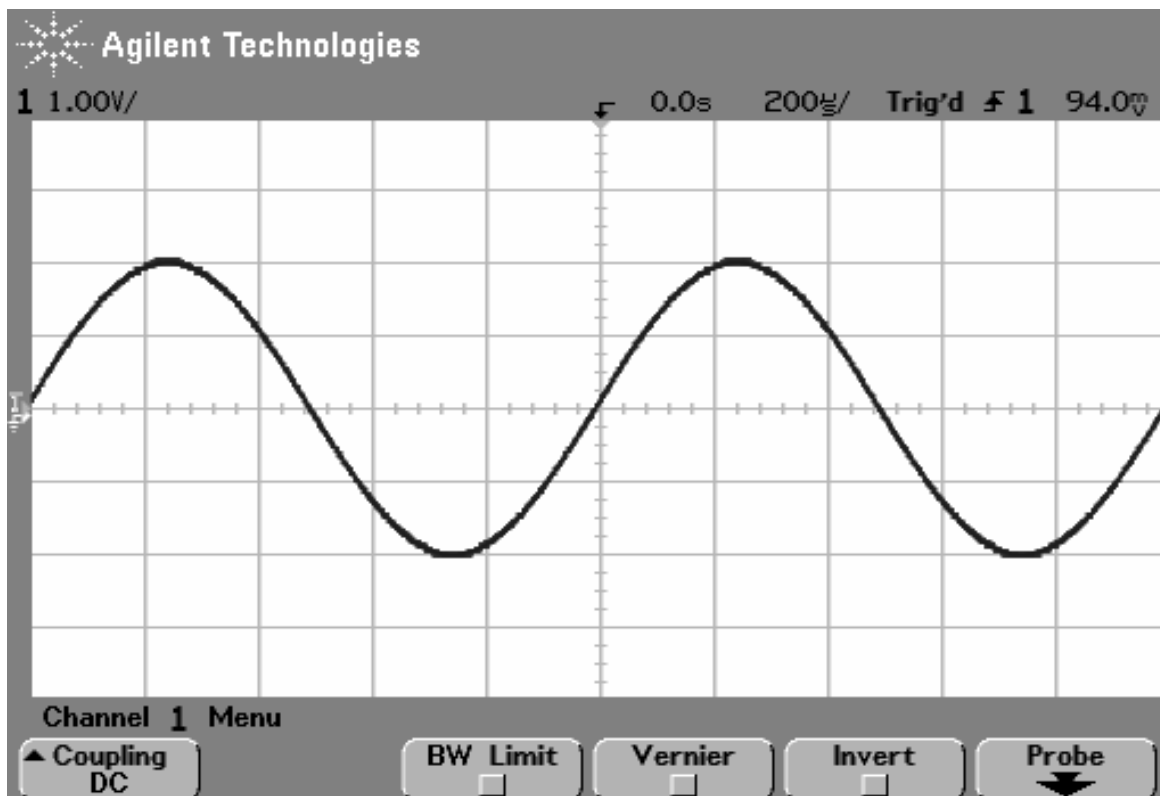
Přeslechy mezi kanály:

$U_{in} = 1\text{V}$

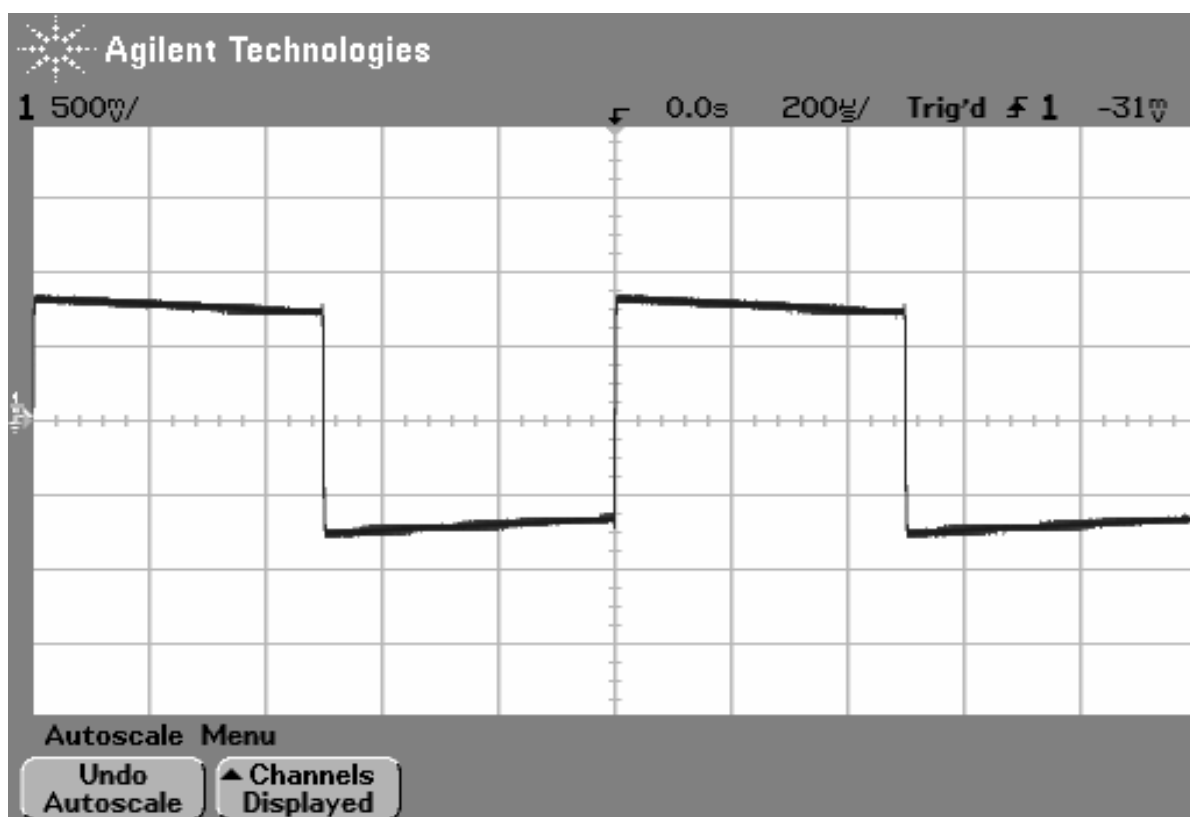
Cesta	f [kHz]	0,1	1	10	30
Z levého do pravého	U[mV]	1,17	1,15	1,36	2,15
	Au[dB]	-58,63	-58,78	-57,32	-53,35
Z pravého do levého	U[mV]	1,29	1,38	2,14	3,09
	Au[dB]	-57,79	-57,21	-53,39	-50,20

Tab. 16 Přeslechy mezi kanály

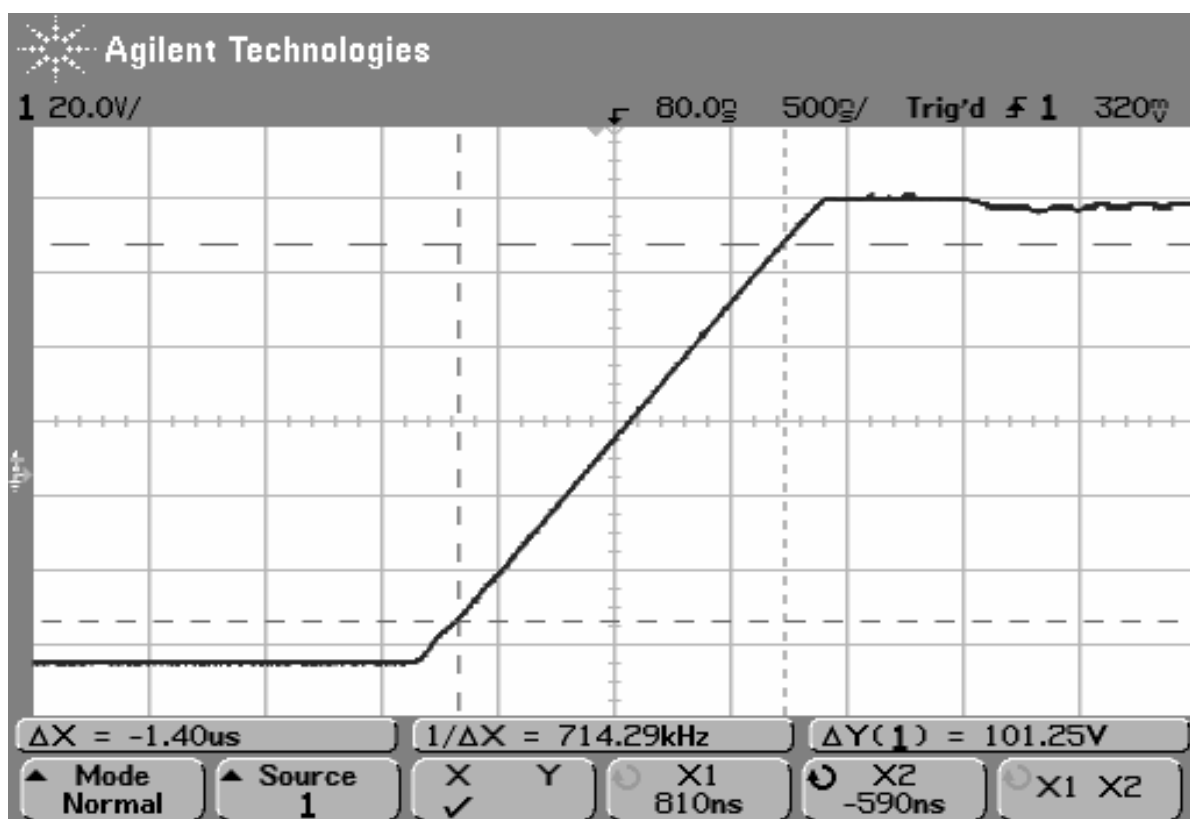
4.1.5 Průběhy naměřené na osciloskopu



Obr. 4.1 Výstupní sinusový signál při $A_u = 1$ a $U_{vst} = 750\text{mV}$



Obr. 4.2 Odezva na obdélníkový signál pro $A_u = 1$ (korekce ve středové poloze)



Obr. 4.3 Zvětšení obdélníku pro měření rychlosti přeběhu

4.2 Koncový stupeň

4.2.1 Frekvenční charakteristika a zkreslení

f [Hz]	1	2	5	10	12	15	20	30	50
U _a [V]	0,42	1,58	10,22	18,6	18,78	19,26	19,64	19,93	20,1
A _a [db]	-33,6549	-22,1468	-5,9309	-0,7297	-0,6460	-0,4268	-0,2571	-0,1298	-0,0560
P _a [W]	0,04	0,62	26,11	86,49	88,17	92,74	96,43	99,30	101,00
U _b [V]	0,024	0,55	2,56	3,58	3,73	3,83	3,9	3,96	3,99
A _b [db]	-44,4825	-17,2794	-3,9219	-1,0090	-0,6525	-0,4227	-0,2654	-0,1328	-0,0672
P _b [W]	0,00	0,08	1,64	3,20	3,48	3,67	3,80	3,92	3,98
f [Hz]	70	100	200	500	700	1000	2000	3000	5000
U _a [V]	20,18	20,21	20,22	20,22	20,22	20,23	20,23	20,21	20,19
A _a [db]	-0,0215	-0,0086	-0,0043	-0,0043	-0,0043	0,0000	0,0000	-0,0086	-0,0172
P _a [W]	101,81	102,11	102,21	102,21	102,21	102,31	102,31	102,11	101,91
U _b [V]	4,01	4,01	4,019	4,021	4,021	4,021	4,019	4,015	4,011
A _b [db]	-0,0238	-0,0238	-0,0043	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0043	-0,0130	-0,0216
P _b [W]	4,02	4,02	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,03	4,02
f [Hz]	7000	10000	12000	15000	20000	30000	50000	70000	100000
U _a [V]	20,17	20,17	20,17	20,16	20,14	20,1	19,95	Neměřeno pro možné přetížení Boucherotova členu	
A _a [db]	-0,0258	-0,0258	-0,0258	-0,0301	-0,0387	-0,0560	-0,1211		
P _a [W]	101,71	101,71	101,71	101,61	101,40	101,00	99,50		
U _b [V]	4,008	4,003	3,999	3,991	3,981	3,949	3,864	3,759	3,6
A _b [db]	-0,0281	-0,0390	-0,0477	-0,0650	-0,0868	-0,1569	-0,3459	-0,5852	-0,9606
P _b [W]	4,02	4,01	4,00	3,98	3,96	3,90	3,73	3,53	3,24
f [Hz]	120000	150000	200000	300000	500000				
U _b [V]	3,519	3,33	3,006	2,7	2,41				
A _b [db]	-1,1583	-1,6378	-2,5269	-3,4594	-4,4463				
P _b [W]	3,10	2,77	2,26	1,82	1,45				

Tab. 17 Frekvenční charakteristika koncového stupně

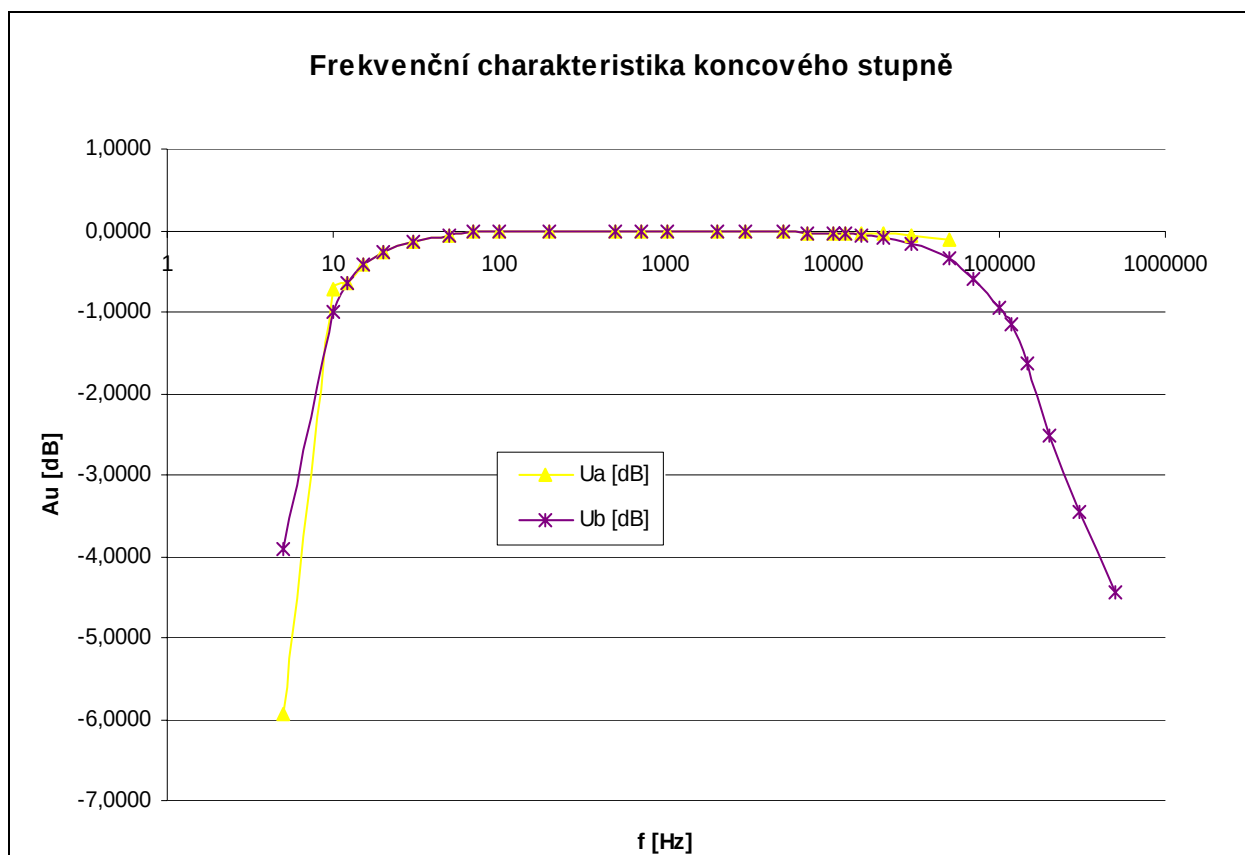
Legenda: U_a měřeno pro U_{výst} = 20V (maximum na dané zátěži)
U_b měřeno pro U_{výst} = 4V (brán ohled na přetížení Boucherotova členu)

U _{výst} [V]	1	2	4	5	8	10	15	20	25	30
2.harm [%]	0,163	0,081	0,066	0,094	0,084	0,022	0,137	0,118	0,0297	0,039
3.harm [%]	0,091	0,042	0,025	0,036	0,043	0,019	0,065	0,055	0,0168	0,087
THD-N [%]	0,044	0,06	0,028	0,034	0,045	0,052	0,034	0,039	0,044	0,054

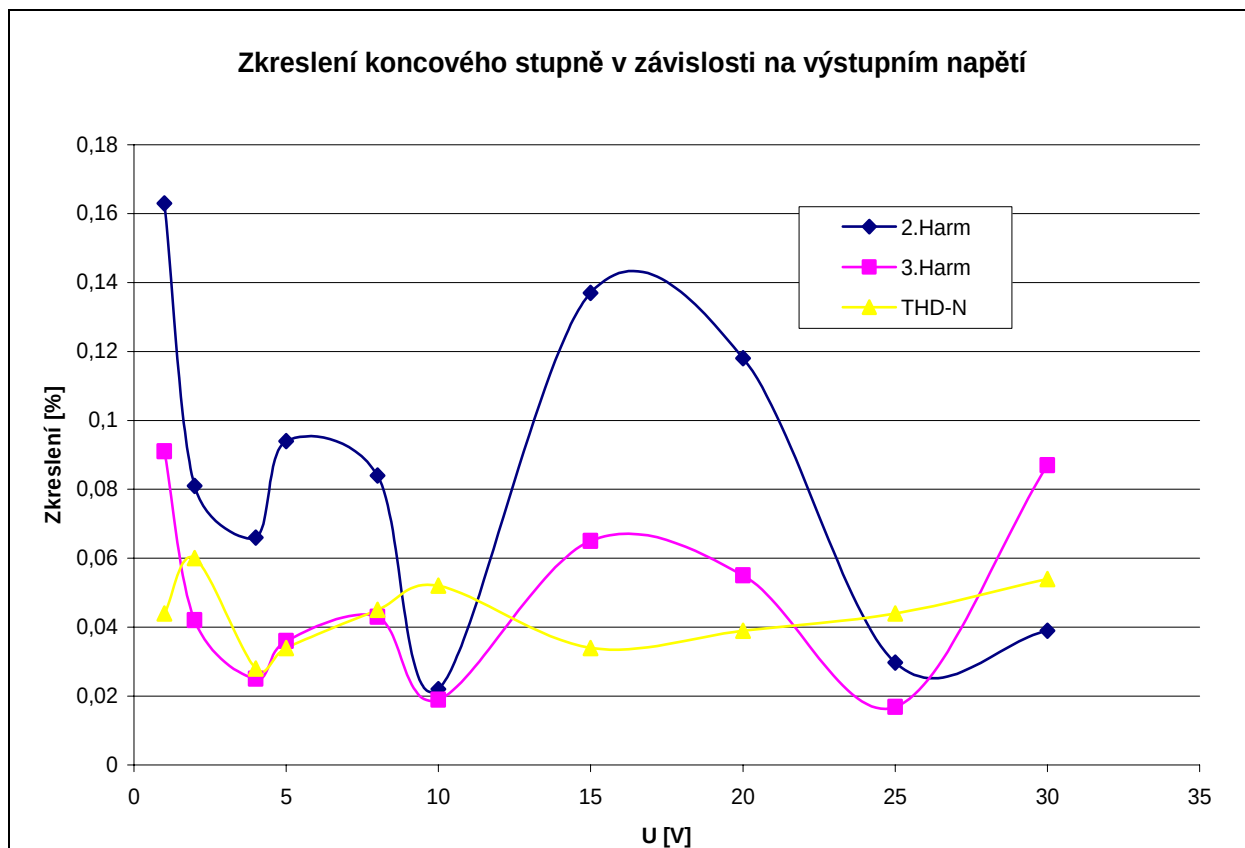
Tab. 18 Závislost zkreslení koncového stupně na výstupním napětí

F [Hz]	f	250	500	1000	2000	4000	8000
THD-N [%]	thd-n	0,084	0,046	0,045	0,084	0,092	0,127

Tab. 19 Zkreslení korekčního zesilovače v závislosti na frekvenci

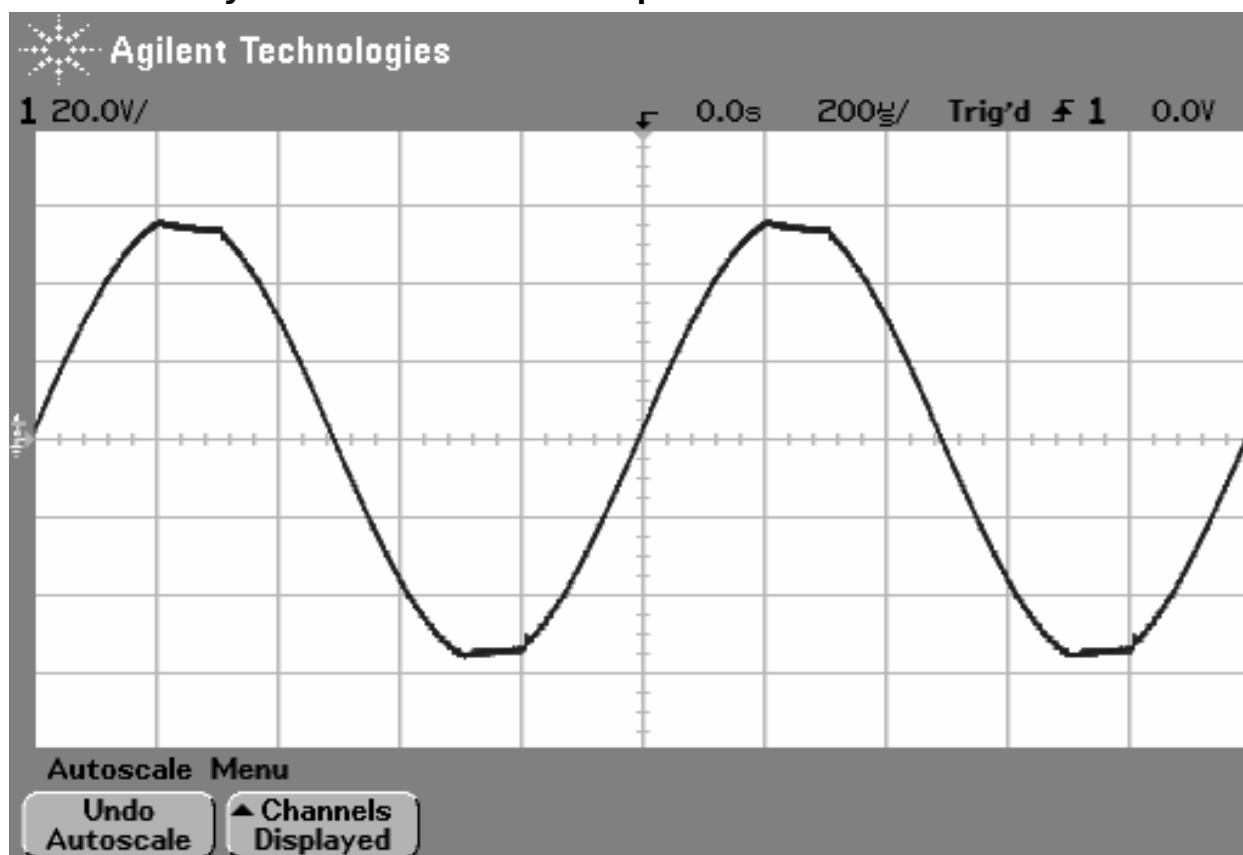


Graf 6 Frekvenční charakteristika koncového stupně

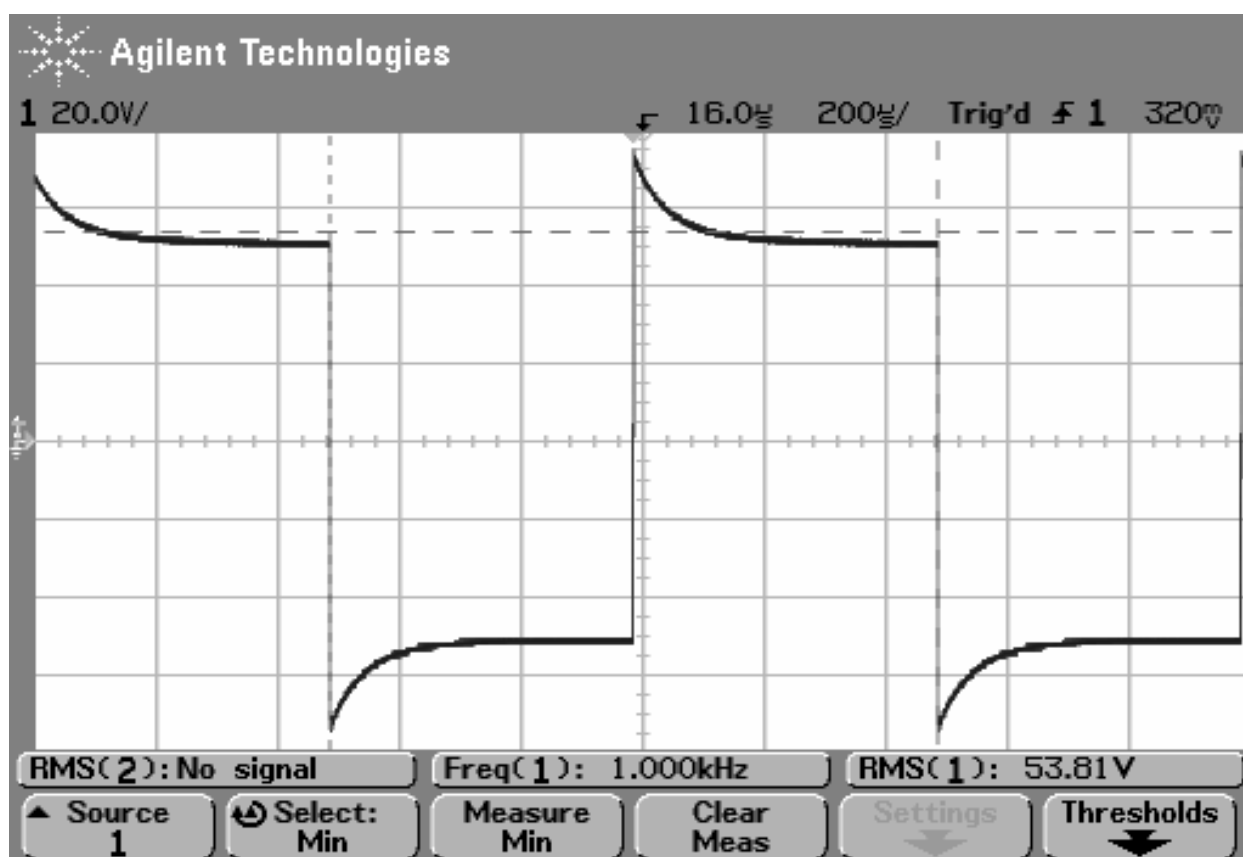


Graf 7 Zkreslení koncového stupně v závislosti na výstupním napětí

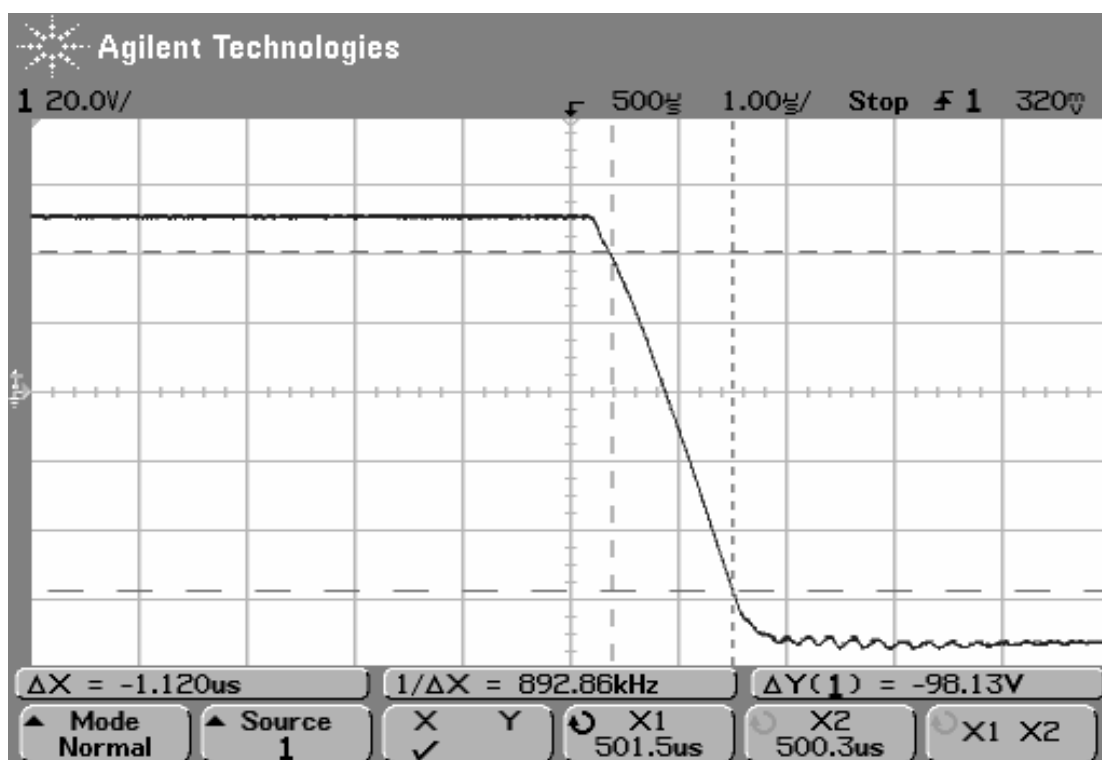
4.2.2 Průběhy naměřené na osciloskopu



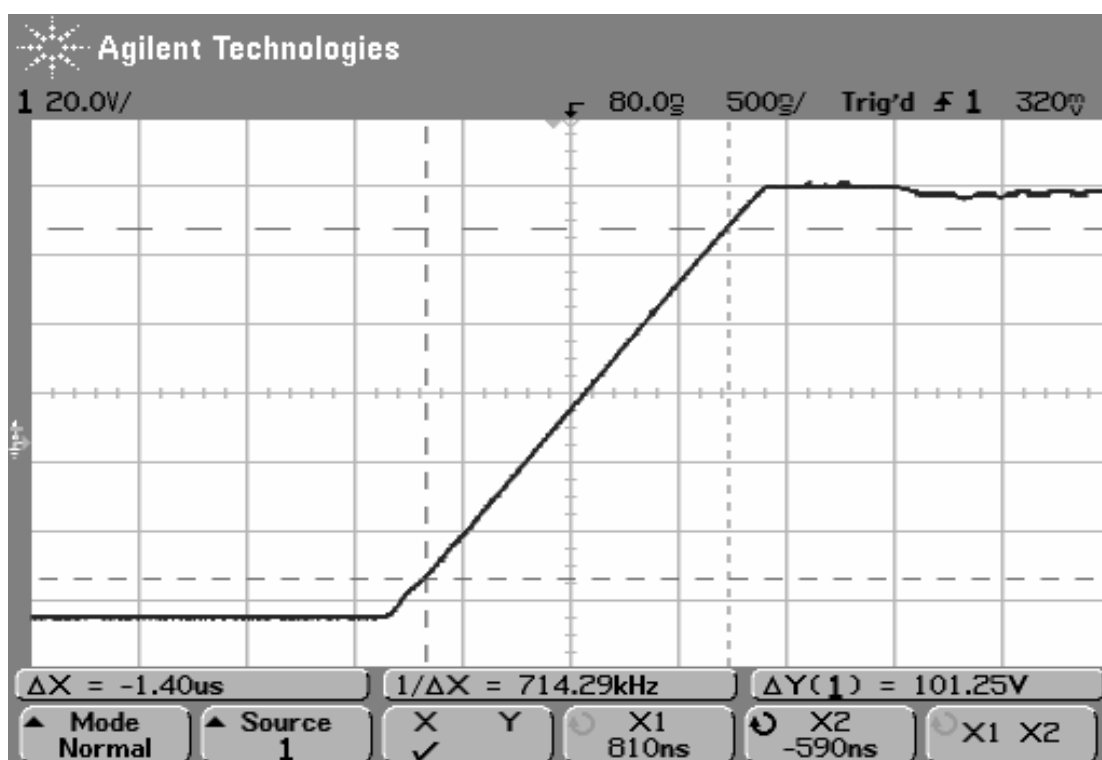
Obr. 4.4 Chování zesilovače v limitaci



Obr. 4.5 Odezva na obdélníkový signál (těsně pod limitací)



Obr. 4.6 Měření rychlosti přeběhu pro sestupnou hranu výstupního napětí



Obr. 4.7 Měření rychlosti přeběhu pro vzestupnou hranu výstupního napětí

Rychlost přeběhu:

Sestupná hraná: $t = 1,12\mu\text{s}$ pro $U = 98,13\text{V}$ $\Rightarrow SR = \frac{U[V]}{t[\mu\text{s}]} = \frac{98,13}{1,12} = 87,6\text{V} / \mu\text{s}$

Vzestupná hraná: $t = 1,40\mu\text{s}$ pro $U = 101,25\text{V}$ $\Rightarrow SR = \frac{U[V]}{t[\mu\text{s}]} = \frac{101,25}{1,40} = 72,3\text{V} / \mu\text{s}$

5 Závěr

V tomto projektu jsem využil vše, co jsem nastudoval v projektu BB1E a BB2E, kde jsem navrhl koncový stupeň, korekční zesilovač a obvod ochran. Dále jsem navrhl modul přepínače vstupů, mikroprocesorového ovládání a softstartu.

Při realizaci vzorků jsem se setkal s problémem nestability koncového stupně a tudíž jsem musel zesilovač celkově překompenzovat, ačkoliv v PSpice byl stabilní. Po překompenzování se v koncovém stupni objevil problém se stabilitou proudu VAS části, proto jsem se po několika dnech marných pokusů rozhodl vypustit část osazení a změnit zesilovač na nesymetrický. Tato změna přinesla nejen lepší stabilitu, ale i celkové zvýšení rychlosti přeběhu. Ostatní moduly fungovali po oživení bez větších problémů.

Po změření vzorku, jehož výsledky jsou uvedeny v této práci, jsem zjistil, že rychlost přeběhu koncového stupně a šířka přenášeného pásma jsou vyšší než simulované hodnoty. Nespokojen jsem s odstupem cizích napětí mezi kanály u korekčního předzesilovače, které je nepatrně vyšší než 50dB, což je dle norem naprosté minimum pro jejich splnění. U modulů, které nezpracovávají signál jsem měřil pouze jejich funkčnost, tudíž jejich výsledky nejsou uvedeny.

Nejvíce času na bakalářské práci jsem strávil oživováním a výrobou přístrojové skříně. Ačkoliv jsem se snažil návrh mechanické části udělat co nejjednodušeji, zabralo to více času než jsem čekal. Bohužel mi nezbyl čas nechat si vyrobit hezčí ovládací knoflíky (zatím jsou zde provizorní) a nechat nějakým způsobem popsat čelní a zadní panel, aby přístroj vypadal více profesionálně. Tyto maličkosti chci realizovat po odevzdání této práce.

Seznam použité literatury

- [1] KOTISA, Zdeněk. NF zesilovače 1. – předzesilovače. Praha: BEN – technická literatura, 2003. 96 s. ISBN 807300030X
- [2] KOTISA, Zdeněk. NF zesilovače 2. – integrované výkonové zesilovače. Praha: BEN – technická literatura, 2002. 96 s. ISBN 8073000539
- [3] KOTISA, Zdeněk. NF zesilovače 3. – tranzistorové výkonové zesilovače. Praha: BEN – technická literatura, 2003. 96 s. ISBN 8073000652
- [4] VORÁČEK, Vojtěch. NF zesilovače 4. – Zesilovače Leach a jejich doplňky. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 104 s. ISBN 8073002116
- [5] WIRSUM, Siegfried. Abeceda NF techniky. BEN – technická literatura, 1997. 191 s. ISBN 0071341196
- [6] SELF, Douglas. Audio Power Amplifier Design Handbook. New York: Newness – ELSEVIER, 2006. 488 s. ISBN 0750680725
- [7] SLONE, G. Randy. High-power audio amplifier construction manual: 50 to 500 Watts for the audio perfectionist. New York: McGraw-Hill, 1988. 476 s. ISBN 0071341196
- [8] Přednáška BNFE č. 1. bnfe_prednaska_1.pdf. Ing. Tomáš Kratochvíl, VUT FEKT Brno, 2006
- [9] Přednáška BNFE č. 3. bnfe_prednaska_3.pdf. Ing. Tomáš Kratochvíl, VUT FEKT Brno, 2006
- [10] Přednáška BNFE č. 5. bnfe_prednaska_5.pdf. Ing. Tomáš Kratochvíl, VUT FEKT Brno, 2006
- [11] Moderní výkonové zesilovače řady DPA. Amatérské Rádio řada A 1,2,3,4,10,11/1992. Amaro, 1992
- [12] ČERMÁK,J., JURKOVIČ,K. Návrh a konstrukce nízkofrekvenčních tranzistorových zesilovačů: STNL, 1974. 374s.
- [13] Stránky Roda Elliota: <http://sound.westhost.com/projects.htm>
- [14] Stránky W. Marshalla Leacha: <http://users.ece.gatech.edu/~mleach/lowtim/>

Seznam použitých obrázků

Obr. 1.1 Koncové tranzistory bez předpětí (tř. B)	11
Obr. 1.2 Koncové tranzistory s předpětím (tř. AB)	11
Obr. 1.3 Komplementární Darlingtonova dvojice	12
Obr. 1.4 Kvazikomplementární zapojení	12
Obr. 2.1 Blokové schéma navrhovaného výkonového zesilovače.....	15
Obr. 2.2 Schéma subsonického filtru svázaného s korekčním zesilovačem.....	17
Obr. 2.3 Přenosová a fázová charakteristika korekčního předzesilovače (parametr = 50kΩ).....	18
Obr. 2.4 Korekční charakteristika předzesilovače (normální režim).....	18
Obr. 2.5 Korekční charakteristika předzesilovače (režim potlačení korekcí).....	19
Obr. 2.6 Schéma zapojení na desce korekčního zesilovače.....	20
Obr. 2.7 Spodní strana desky korekčního zesilovače	21
Obr. 2.8 Vrchní strana desky korekčního zesilovače.....	21
Obr. 2.9 Osazovací výkres desky korekčního zesilovače	22
Obr. 2.10 Blokové uspořádání celosymetrického zapojení koncového stupně	24
Obr. 2.11 Schéma celosymetrického zapojení koncového stupně pro simulace v PSpice	27
Obr. 2.12 Schéma nesymetrického zapojení koncového stupně pro simulace v PSpice	28
Obr. 2.13 Přenosová a fázová charakteristika koncového stupně.....	29
Obr. 2.14 Odezva zesilovače na obdélníkový signál s různou amplitudou vstupního signálu.....	29
Obr. 2.15 Odezva zesilovače na obdélníkový signál, zvětšení hran pro určení SR.....	30
Obr. 2.16 Limitovaný signál $f = 1\text{kHz}$, ztrátový výkon na aktiv. prvcích a zátěži $R = 4\Omega$	30
Obr. 2.17 Výstupní průběhy pro $f = 1\text{kHz}$, $R_z = 4\Omega$ a různou amplitudu na vstup. napětí	31
Obr. 2.18 Výstupní průběhy pro $f = 10\text{kHz}$, $R_z = 4\Omega$ a různou amplitudu na vstup. napětí	31
Obr. 2.19 Výstupní průběhy pro $f = 20\text{kHz}$, $R_z = 4\Omega$ a různou amplitudu na vstup. napětí	32
Obr. 2.20 Výstupní průběhy pro $f = 50\text{kHz}$, $R_z = 4\Omega$ a různou amplitudu na vstup. napětí	32
Obr. 2.21 Výstupní průběhy pro $f = 1\text{kHz}$, $U_{vst} = 4V_{pp}$ a různé velikosti zatěžovací impedance	33
Obr. 2.22 Schéma zapojení desky koncového zesilovače včetně napájecího zdroje.....	34
Obr. 2.23 Vrchní strana desky konc.stupně Obr. 2.24 Spodní strana desky konc. stupně	35
Obr. 2.25 Osazovací výkres desky koncového zesilovače (zmenšeno na 90%).....	36
Obr. 2.26 Závislost proudu výstupního prvku (relé, LED dioda) na ss. vstupním napětí	40
Obr. 2.27 Závislost proudu výstupního prvku (relé, LED dioda) na ss. vstupním napětí	40
Obr. 2.28 Schéma zapojení na desce ochran.....	41
Obr. 2.29 Vrchní strana desky ochran Obr. 2.30 Spodní strana desky ochran	42
Obr. 2.31 Osazovací výkres desky ochran.....	42
Obr. 2.32 Schéma zapojení modulu mikroprocesorového ovládání	45
Obr. 2.33 Vrchní strana desky mikroprocesorového ovládání	46
Obr. 2.34 Spodní strana desky mikroprocesorového ovládání	46
Obr. 2.35 Osazovací výkres desky mikroprocesorového ovládání (TOP).....	46
Obr. 2.36 Osazovací výkres desky mikroprocesorového ovládání (BOTTOM)	47
Obr. 2.37 Schéma zapojení desky přepínače vstupů.....	49
Obr. 2.38 Vrchní strana desky přepínače vstupů	50
Obr. 2.39 Spodní strana desky přepínače vstupů	50
Obr. 2.40 Osazovací výkres desky přepínače vstupů	50
Obr. 2.41 Schéma zapojení desky pomocného napájecího zdroje.....	53
Obr. 2.42 Vrchní strana desky pomocného napájecího zdroje	53
Obr. 2.43 Spodní strana desky pomocného napájecího zdroje	53
Obr. 2.44 Osazovací výkres desky pomocného napájecího zdroje.....	54
Obr. 2.45 Schéma zapojení desky softstartu	56
Obr. 2.46 Spodní strana desky softstartu	56
Obr. 2.47 Osazovací výkres desky softstartu (1,5:1).....	56

Obr. 2.48 Přechodové děje v softstartu po zapnutí a vypnutí přístroje.....	57
Obr. 3.1 Pohled na přístrojovou skříň shora v měřítku 3:1.....	60
Obr. 3.2 Pohled na přístrojovou skříň zepředu v měřítku 3:1.....	61
Obr. 3.3 Pohled na připevnění profilů na chladič v měřítku 3:1.....	61
obr. 3.4 Výkres předního panelu v měřítku 1:2	62
Obr. 3.5 Výkres zadního panelu v měřítku 1:2.....	63
Obr. 3.6 Uspořádání modulů na nosné desce.....	64
Obr. 3.7 Umístění transformátoru na nosné desce	64
Obr. 3.8 Deska koncového stupně – bez koncových tranzistorů	65
Obr. 3.9 Deska koncového stupně umístěná na chladiči (pohled shora)	65
Obr. 3.10 Deska koncového stupně umístěná na chladiči (boční pohled)	65
Obr. 3.11 Pohled na zesilovač přední panel.....	66
Obr. 3.12 Pohled na zesilovač shora.....	66
Obr. 3.13 Pohled na zesilovač zadní panel	66
Obr. 4.1 Výstupní sinusový signál při $A_u = 1$ a $U_{vst} = 750\text{mV}$	72
Obr. 4.2 Odezva na obdélníkový signál pro $A_u = 1$ (korekce ve středové poloze)	73
Obr. 4.3 Zvětšení obdélníku pro měření rychlosti přeběhu	73
Obr. 4.4 Chování zesilovače v limitaci.....	76
Obr. 4.5 Odezva na obdélníkový signál (těsně pod limitací).....	76
Obr. 4.6 Měření rychlosti přeběhu pro sestupnou hranu výstupního napětí.....	77
Obr. 4.7 Měření rychlosti přeběhu pro vzestupnou hranu výstupního napětí.....	77

Seznam tabulek

Tab. 1 Seznam součástí korekčního předzesilovače vygenerovaný v programu Eagle.....	23
Tab. 2 Seznam součástí koncového zesilovače vygenerovaný v programu Eagle.....	38
Tab. 3 Seznam změn při osazování nesymetrické verze.....	38
Tab. 4 Seznam součástí ochrany vygenerovaný v programu Eagle.....	43
Tab. 5 Seznam součástí mikroprocesorového ovládání vygenerovaný v programu Eagle.....	47
Tab. 6 Seznam součástí ovládání vstupů vygenerovaný v programu Eagle	51
Tab. 7 Seznam součástí pomocného napájecího zdroje vygenerovaný v programu Eagle.....	54
Tab. 8 Seznam součástí pomocného napájecího zdroje vygenerovaný v programu Eagle.....	57
Tab. 9 Frekvenční charakteristika pro levý kanál korekčního předzesilovače	67
Tab. 10 Frekvenční charakteristika pro pravý kanál korekčního předzesilovače.....	68
Tab. 11 Vliv zapnutí obvodu potlačení korekcí pro levý kanál.....	69
Tab. 12 Vliv zapnutí obvodu potlačení korekcí pro pravý kanál.....	69
Tab. 13 Zkreslení korekčního zesilovače v závislosti na výstupním napětí.....	71
Tab. 14 Zkreslení korekčního zesilovače v závislosti na frekvenci.....	71
Tab. 15 Útlum po aktivaci MUTE obvodu	72
Tab. 16 Přeslechy mezi kanály	72
Tab. 17 Frekvenční charakteristika koncového stupně.....	74
Tab. 18 Závislost zkreslení koncového stupně na výstupním napětí.....	74
Tab. 19 Zkreslení korekčního zesilovače v závislosti na frekvenci.....	74

Seznam grafů

Graf 1 Frekvenční charakteristika pro levý kanál korekčního předzesilovače.....	67
Graf 2 Frekvenční charakteristika pro pravý kanál korekčního předzesilovače.....	68
Graf 3 Vliv zapnutí obvodu potlačení korekcí pro levý kanál.....	70
Graf 4 Vliv zapnutí obvodu potlačení korekcí pro pravý kanál.....	70
Graf 5 Zkreslení korekčního zesilovače v závislosti na výstupním napětí.....	71
Graf 6 Frekvenční charakteristika koncového stupně.....	75
Graf 7 Zkreslení koncového stupně v závislosti na výstupním napětí.....	75

Seznam symbolů, veličin a zkratek

AC analýza	frekvenční analýza malých průběhů v okolí pracovního bodu součástek
DPS	deska plošných spojů
$f_{\max}$	maximální dosažitelná frekvence pro pokles zisku o 3dB
f_{mez}	frekvence, na které zisk poklesne o 3dB od nominální úrovně
f_t	tranzitní frekvence – frekvence na které součástka již nezesiluje
LED	
I_{rele}	nominální spínací proud relé
MP	mikroprocesor
Nf	nízkofrekvenční
R_v	celkový tepelný odpor
R_{vsa}	tepelný odpor chladiče
R_{vjc}	tepelný odpor izolační podložky
R_{vcs}	tepelný odpor vnitřní
SOAR	Safe operating area – bezpečná pracovní oblast tranzistoru
SR	Slew rate – rychlost přeběhu
U_{ak}	napětí na diodě v propustném směru
U_{be}	napětí na přechodu báze-emitor bipolárního tranzistoru v propustném směru
U_{ce}	napětí mezi kolektorem a emitorem bipolárního tranzistoru
U_{cemax}	maximální povolené nedestrukční napětí mezi kolektorem a emitorem
U_d	napětí na diodě v propustném směru, nebo na Zenerově diodě v závěrném směru
U_{qsat}	saturační napětí tranzistoru
U_{rele}	nominální napětí relé
U_n	napájecí napětí obvodu
U_{vst}	vstupní napětí
$U_{výst}$	výstupní napětí
ν_{sa}	teplota chladiče
ν_j	teplota přechodu
ν_a	teplota okolí

Příloha:

Výpis programu pro mikroprocesorové ovládání:

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>

#define F_CPU 2E6 //definujeme taktovací rychlost procesoru
#include <util/delay.h>

//definice proměnných
unsigned int mute;
uint8_t j;
uint8_t buff=0; //byty 0a2 adc0, 1a3 adc1, 6a7 mute

int main( void )
{
    // povolí ADC
    ADMUX=(0<<MUX0|1<<REFS0);
    ADCSRA=(1<<ADPS2|0<<ADPS1|1<<ADPS0|1<<ADEN|1<<ADSC|1<<ADIE|1<<ADFR);

    //povolí a nastaví čítač 0
    TCCR0=(1<<CS02|0<<CS00);
    TCCR2=(1<<CS22|1<<CS21|1<<CS20);
    TIMSK=(1<<TOIE0|1<<TOIE2);

    //nastavení pull up rezistoru
    DDRC=(1<<DDC4|1<<DDC5); //nastavení všech výstupních portů C
    DDRB=(1<<DDB0|1<<DDB1|1<<DDB2|1<<DDB3|1<<DDB4|1<<DDB5); //nastavení všech výstupních portů
    PORTB=(1<<PORTB0|0<<PORTB1|1<<PORTB2|1<<PORTB3|1<<PORTB4|1<<PORTB5); //úroveň výstup portů
    DDRD=(1<<DDD0|1<<DDD1|1<<DDB4|1<<DDB5|1<<DDB6|1<<DDB7); //nastavení všech výstupních portů D
    PORTD=(1<<PORTD0|1<<PORTD1|1<<PORTD2|1<<PORTD3|0<<PORTD4|1<<PORTD5|1<<PORTD6|1<<PORT
    D7); //aktivace pull up rezistorů;
    GICR=(1<<INT0|1<<INT1); //povolení přerušení INT0, INT1
    //MCUCR=(1<<ISC01|1<<ISC11); //pro konkrétní úroveň tlačítek

    sei() ;
    while( 1 );
}

ISR( INT0_vect )
{
    TIMSK^=(1<<TOIE0); // vypne časovač aby nedošlo k přepnutí na jiné tlačítko

    if(bit_is_clear(PINB,0)|bit_is_clear(PIND,6)) //vstup 3
    {
        PORTD&=0b11111110; //zapne mute
        _delay_ms (5); //zpoždění
        PORTD|=0b11110000; //vypne všechna vstupní relé
        _delay_ms (100); //zpoždění
        PORTD^=(1<<6); //zapne vybrané relé
        _delay_ms (100);
        PORTD|=(1<<0); //vypne mute
    }

    if(bit_is_clear(PINB,1)|bit_is_clear(PIND,7)) //vstup 4
    {
        PORTD&=0b11111110; //viz odstavec pro tlač.1
        _delay_ms (5);
        PORTD|=0b11110000;
        _delay_ms (100);
    }
}
```

```

        PORTD^=(1<<7);
        _delay_ms (100);
        PORTD|=(1<<0);
    }

    if( bit_is_clear( PINB, 2 ))          //mute
    {
        buff^=(1<<7); //bit pro přidání zpoždění a odpojení celkové zátěže
        mute=0;        //vynuluje zpoždění pro odpojení zátěže
        PORTB^=(1<<6); //přepne diodu
        PORTD^=(1<<0); //přepne optočlen
        _delay_ms (100);
        if( bit_is_set( PIND, 0 ))
        {
            buff&=0b00111111;
            PORTB|=(1<<5);      //vypne diodu pokud je vypnutý optočlen
        }
    }

    _delay_ms (10);
    while (bit_is_clear(PIND,2)) //ochrana před zákmity tlačítka
        _delay_ms (10);

    TIMSK^=(1<<TOIE0); //zapne časovač pro cyklování tlačítek
}

ISR( INT1_vect ) //krom bitu PINB2 je vše stejné jako pro INT0
{
    TIMSK^=(1<<TOIE0);

    if(bit_is_clear(PINB,0)|bit_is_clear(PIND,4)) //vstup1
    {
        PORTD&=0b11111110; //viz odstavec pro tlač.1
        _delay_ms (5);
        PORTD|=0b11110000;
        _delay_ms (100);
        PORTD^=(1<<4);
        _delay_ms (100);
        PORTD|=(1<<0);
    }

    if(bit_is_clear(PINB,1)|bit_is_clear(PIND,5)) //vstup 2
    {
        PORTD&=0b11111110; //viz odstavec pro tlač.1
        _delay_ms (5);
        PORTD|=0b11110000;
        _delay_ms (100);
        PORTD^=(1<<5);
        _delay_ms (100);
        PORTD|=(1<<0);
    }

    if( bit_is_clear( PINB, 2 ))          //tlačítko pro korekce
    {
        PORTD^=(1<<1); //vypne nebo zapne korekce s ind (střídavě dle předchozí úrovně)
    }

    _delay_ms (10);
    while (bit_is_clear(PIND,3))
        _delay_ms (10);

    TIMSK^=(1<<TOIE0);
}

```

```
}
```

```
ISR( ADC_vect )          // AD převodník
                        // sledování teploty čidla 1 a 2 (3,4 nejsou využita)
```

```
{
```

```
    if (ADCW>=180)
    {
        //je li teplota < 65 stupňů
        if (bit_is_set(ADMUX,0))
            buff&=0b11110101; //vypne signalizaci a připne relé
        else
            buff&=0b11111010;
```

```
    }
```

```
    if ((ADCW<180)&(ADCW>114))
```

```
    {
```

```
        //je li teplota větší než 65 stupňů a menší než 80 stupňů
        if (bit_is_set(ADMUX,0)) //čidlo 1 nebo 2
            buff|=(1<<1);
        else
            buff|=(1<<0);
```

```
    }
```

```
    if (ADCW<=114)
```

```
    {
```

```
        //je li teplota > 80 stupňů
        if (bit_is_set(ADMUX,0))
            buff|=(1<<3);
        else
            buff|=(1<<2);
```

```
    }
```

```
}
```

```
ISR(TIMER0_OVF_vect)// přepínání větví matice tlačítek
```

```
{
```

```
    // postupně střídá jednotlivé výstupy s frekvencí časovače0
    if( bit_is_clear( PINB, 0 )) PORTB^=(1<<PORTB1|1<<PORTB0);
    if( bit_is_clear( PINB, 1 )) PORTB^=(1<<PORTB2|1<<PORTB1);
    if( bit_is_clear( PINB, 2 )) PORTB^=(1<<PORTB0|1<<PORTB2);
```

```
}
```

```
ISR(TIMER2_OVF_vect)
```

```
{
```

```
    if (bit_is_clear(buff,1)) PORTB|=(1<<3); //ovládání diody therm1 (zhasne) -nízká teplota
    if (bit_is_clear(buff,0)) PORTB|=(1<<4); //ovládání diody therm2 (zhasne) -nízká teplota
```

```
    if (bit_is_set(buff,3)) PORTB&=0b11110111; //rozsvítí diodu therm1 -vysoká teplota
    else
```

```
        if (bit_is_set(buff,1)) PORTB^=(1<<3); //přepne napěťovou roveň na diodě therm1
```

```
    if (bit_is_set(buff,2)) PORTB&=0b11101111; //rozsvítí diodu therm2 -vysoká teplota
    else
```

```
        if (bit_is_set(buff,0)) PORTB^=(1<<4); //přepne napěťovou roveň na diodě therm1
```

```
    if (bit_is_set(buff,2)|bit_is_set(buff,6)) //při přehřátí ind1, nebo dlouhém mute
        PORTC|=(1<<4); //odepne relé
```

```
    else PORTC&=0b11110111; //sepne relé
```

```
    if (bit_is_set(buff,3)|bit_is_set(buff,6)) //při přehřátí ind2, nebo dlouhém mute
        PORTC|=(1<<5); //odepne relé
```

```
    else PORTC&=0b11101111; //sepne relé
```



```

if (bit_is_set(buff,7))          //je li spuštěno mute dlouho odepne relé
{
    PORTB^=(1<<5);
    if(mute<2500) mute++; //zpoždění
    else
    {
        buff|=(1<<6);
        PORTB&=0b11011111;      //signál odepnutí
    }
}
if(j<20) j++;
else ADMUX^=(1<<MUX0);          //přepne na druhý senzor (zapojeny jsou dvě čidla)
}

```