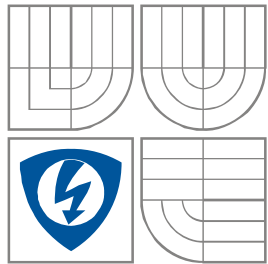


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# NÁVRH SPÍNAČOVÉHO NÍZKOFREKVENČNÍHO ZESILOVAČE

DESIGN OF SWITCHING LOW-FREQUENCY POWER AMPLIFIER

SEMESTRÁLNÍ PROJEKT  
BACHELOR'S PROJECT

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Josef Janáč

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

BRNO, 2008

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Josef Janáč  
Bytem: Valašská Polanka 66, 756 11  
Narozen/a (datum a místo): 2. května 1986 ve Vsetíně

(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 spínačového nízkofrekvenčního zesilovače

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 činností 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 jejímu 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

## ABSTRAKT

Náplní této bakalářské práce je zmapování spínačových technologií používaných v nízkofrekvenční výkonové elektronice a následné využití nabytých znalostí pro ideový návrh spínačového nízkofrekvenčního výkonového zesilovače, jakožto funkčního samostatného celku. Obsahem návrhu je tedy nízkofrekvenční výkonový zesilovací stupeň pracující na principu spínačové technologie. Dále korekční předzesilovač s možností ovládní hlasitosti, balance, vysokých a nízkých kmitočtů a spínaný napájecí zdroj. Další částí projektu je seznámení se s návrhovým programem plošných spojů Eagle a optimalizačním programem pro spínaný zdroj PXLS expert a vytvoření konstrukčních podkladů pro kompletní zařízení. Dokončení práce spočívá v oživení všech funkčních částí zařízení a sestavení v celek. Dále pak měření základních parametrů na zhotoveném funkčním celku, grafické zpracování naměřených hodnot a porovnání s katalogovými údaji nebo případnými simulacemi. Závěrem práce je zhodnocení dosažených výsledků v porovnání s předpokládaným cílem práce.

## ABSTRACT

This bachelor project maps out switching technologies used in LF power electronics and gained information was consequentially used to design switching lf power amplifier as independent unit. Content of design is LF power amplified level, working on switching technology principle. Correction pre-amplifier with possibility of adjusting volume, balance h/l frequency and switching power supply is content as well too. Next part of project is familiarization s design program Eagle and optimizing program for switching power supply PXLS expert and creating constrictive basis for complete device. Last part of project is basically activation all functional part of device in one unit. Than measurement basic parameters on created functional device, graphical elaborating measurement-gained values and confrontation with catalog values. Conclusion of this project is evaluation achieved results in compare with supposed result of project.

## KLÍČOVÁ SLOVA

nízkofrekvenční zesilovač  
spínačová technologie  
pulzně šířková modulace  
pracovní třída D  
hlasitost  
vyvážení kanálů  
napájecí zdroj

## KEYWORDS

low-frequency amplifier  
switching technology  
pulse width modulation  
class D  
volume  
balance  
power supply unit

JANÁČ, J. Návrh spínačového nízkofrekvenčního zesilovače: *bakalářská práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 60 stran, 1 příl.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh spínačového nízkofrekvenčního zesilovače jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a 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 mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....  
podpis autora

# Obsah

|        |   |        |
|--------|---|--------|
| 1.     | Úvod .....  | - 8 -  |
| 1.1    | Problematika spínačových zesilovačů .....                                     | - 9 -  |
| 1.2    | Popis jednotlivých tříd spínačových zesilovačů .....                          | - 10 - |
| 1.2.1  | Pracovní třída D .....  | - 10 - |
| 1.2.2  | Pracovní třída E .....  | - 11 - |
| 1.2.3  | Pracovní třída F .....  | - 12 - |
| 1.2.4  | Pracovní třída I .....  | - 12 - |
| 1.2.5  | Pracovní třída S .....  | - 13 - |
| 1.2.6  | Pracovní třída T .....  | - 13 - |
| 1.2.8  | Pracovní třída Z .....  | - 15 - |
| 1.3.   | Srovnání pracovních tříd .....  | - 16 - |
| 2.     | Ideový návrh nízkofrekvenčního výkonového spínačového zesilovače .....        | - 17 - |
| 2.1.   | Volba metody realizace projektu .....   | - 17 - |
| 2.1.1. | Účel zařízení .....   | - 17 - |
| 2.2.   | Volba vhodných komponentů nf zesilovače .....                                 | - 18 - |
| 2.2.1. | Předzesilovač + korekce .....   | - 18 - |
| 2.2.2. | Koncový zesilovací stupeň .....   | - 18 - |
| 2.2.3. | Napájecí zdroj .....  | - 19 - |
| 3.     | Řešení komponentů zesilovače .....  | - 20 - |
| 3.1.   | Předzesilovač s korekcemi a ovládací panel .....                              | - 20 - |
| 3.1.1. | Popis zapojení základní desky předzesilovače .....                            | - 20 - |
| 3.1.2. | Popis zapojení kontrolního panelu .....                                       | - 22 - |
| 3.1.3. | Předpokládané parametry předzesilovače .....                                  | - 22 - |
| 3.2.   | Koncový nf zesilovací stupeň .....  | - 25 - |
| 3.2.1. | Návrh cívek výstupních LC filtrů .....  | - 25 - |
| 3.2.2. | Popis zapojení .....  | - 27 - |
| 3.2.3. | Vnitřní zapojení hybridního obvodu STK428-610 .....                           | - 28 - |
| 3.3.   | Návrh spínaného napájecího zdroje .....                                       | - 31 - |
| 3.3.1. | Určení parametrů zdroje .....   | - 31 - |
| 3.3.2. | Výběr vhodných komponentů zdroje .....  | - 32 - |
| 3.3.3. | Počítačový návrh spínaného zdroje .....                                       | - 33 - |
| 3.3.4. | Konstrukční návrh transformátoru a cívek výstupních LC filtrů .....           | - 38 - |
| 3.3.5. | Návrh schématu napájecího zdroje .....  | - 39 - |
| 4.     | Realizace zařízení .....  | - 42 - |
| 4.1.   | Realizace jednotlivých komponent zařízení .....                               | - 42 - |
| 4.1.1. | Příprava a osazení plošných spojů .....                                       | - 42 - |
| 4.1.3. | Oživení spínaného napájecího zdroje .....                                     | - 43 - |
| 4.2.2. | Realizace a osazení šasi .....  | - 46 - |
| 5.1.   | Výsledky měření na korekčním předzesilovači .....                             | - 47 - |
| 5.2.   | Výsledky měření koncového nf spínačového zesilovače a napájecího zdroje ..... | - 50 - |
| 5.3.   | Zhodnocení měření .....   | - 54 - |
| 6.     | Závěr .....   | - 56 - |
| 7.     | Seznam literatury .....   | - 57 - |
| 8.     | Seznam zkratk a symbolů .....   | - 58 - |
| 9.     | Přílohy .....   | - 59 - |
| 9.1.   | Fotografie .....  | - 59 - |

# Seznam obrázků, grafů a tabulek

|             |   |      |
|-------------|---|------|
| Obr. 1.1:   | Blokové schéma PWM modulátoru .....   | 10 - |
| Obr. 1.2:   | Princip PWM modulátoru .....  | 10 - |
| Obr. 1.3:   | Topologie pracovní třídy D .....  | 11 - |
| Obr. 1.4:   | Principiální schéma třídy E .....   | 12 - |
| Obr. 1.5:   | Princip činnosti pracovní třídy I .....   | 13 - |
| Obr. 1.6:   | Princip činnosti třídy T .....  | 14 - |
| Obr. 1.7:   | Principiální schéma třídy TD .....  | 14 - |
| Obr. 1.8:   | Oscilogram činnosti třídy TD .....  | 15 - |
| Obr. 1.9:   | Princip pracovní třídy Z .....  | 15 - |
| Tab. 1.10:  | Tabulka srovnání parametrů jednotlivých tříd .....  | 16 - |
| Obr. 2.1:   | Blokové schéma realizace projektu .....   | 17 - |
| Obr. 3.1:   | Schéma zapojení předzesilovače s obvodem PT2317B .....                                    | 21 - |
| Obr. 3.2:   | Schéma zapojení ovládacího panelu .....   | 22 - |
| Tab. 3.3:   | Tabulka předpokládaných parametrů předzesilovače .....                                    | 22 - |
| Obr. 3.4:   | DPS základní desky předzesilovače .....   | 23 - |
| Obr. 3.6:   | DPS řídicího panelu pro předzesilovač .....   | 23 - |
| Obr. 3.7:   | Rozmístění součástek řídicího panelu předzesilovače .....                                 | 24 - |
| Tab. 3.8:   | Seznam součástek základní desky předzesilovače .....                                      | 24 - |
| Tab. 3.9:   | Seznam součástek ovládacího panelu .....  | 25 - |
| Obr. 3.10:  | Schéma zapojení koncového zesilovacího stupně .....                                       | 26 - |
| Obr. 3.11:  | Vnitřní zapojení obvodu STK428-610 .....  | 28 - |
| Tab. 3.12:  | Tabulka parametrů koncového zesilovacího stupně .....                                     | 28 - |
| Obr. 3.13:  | Obrazec DPS 1:1 .....   | 29 - |
| Obr. 3.13:  | Rozmístění součástek na DPS, strana TOP .....   | 29 - |
| Obr. 3.14:  | Rozmístění součástek na DPS, strana BOTTOM .....  | 30 - |
| Tab. 3.15:  | Seznam součástek nf koncového zesilovacího stupně .....                                   | 30 - |
| Obr. 3.16:  | Tvar feritového jádra impulsního transformátoru a jeho rozměry .....                      | 33 - |
| Tab. 3.17:  | Tabulka parametrů feritového jádra transformátoru .....                                   | 33 - |
| Obr. 3.18:  | Tvar kostřičky pro jádro impulsního transformátoru .....                                  | 33 - |
| Obr. 3.19:  | Předběžné blokové schéma spínaného zdroje .....   | 34 - |
| Obr. 3.20:  | Schéma výstupního usměrňovacího a filtračního obvodu zdroje .....                         | 34 - |
| Tab. 3.21:  | Tabulka parametrů výstupních usměrňovacích a filtračních obvodů .....                     | 34 - |
| Tab. 3.22:  | Výstupní tabulka návrhového programu PIXIs design expert .....                            | 37 - |
| Obr. 3.23:  | Konstrukční schéma impulsního transformátoru .....  | 38 - |
| Tab. 3.24:  | Konstrukční tabulka transformátoru .....  | 38 - |
| Tab. 3.25:  | Konstrukční tabulka cívek výstupních LC filtrů .....                                      | 39 - |
| Obr. 3.27:  | Obrazec DPS zdroje .....  | 41 - |
| Obr. 4.1:   | Konstrukční náčrt předního panelu zařízení .....  | 44 - |
| Obr. 4.2:   | Konstrukční náčrt zadního panelu zařízení .....   | 44 - |
| Tab. 4.3:   | Tabulka rozměrů konstrukčních dílů šasí .....   | 44 - |
| Obr. 4.4:   | Konstrukční náčrt podkladu zařízení .....   | 45 - |
| Obr. 4.5:   | Konstrukční náčrt horního krytu zařízení .....  | 45 - |
| Obr. 4.6:   | Konstrukční náčrt rozmístění součástí zařízení a spojů šasí .....                         | 46 - |
| Graf. 5.1:  | Modulová frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače .....                       | 47 - |
| Graf. 5.2:  | Modulová frekvenční charakteristika korekcí předzesilovače .....                          | 47 - |
| Graf. 5.3:  | Modulová frekvenční charakteristika funkce loudness .....                                 | 48 - |
| Graf. 5.4:  | Graf závislosti zesílení předzesilovače na nastaveném stupni hlasitosti .....             | 48 - |
| Graf. 5.5:  | Graf závislosti harmonického zkreslení na zesílení předzesilovače .....                   | 49 - |
| Graf. 5.6:  | Modulová kmitočtová charakteristika nf koncového zesilovacího stupně .....                | 50 - |
| Graf. 5.7:  | Graf závislosti harmonického zkreslení na výstupním výkonu .....                          | 50 - |
| Obr. 5.8:   | Předpokládaný průběh výstupního signálu na základě simulace v programu Pspice .....       | 51 - |
| Obr. 5.9:   | Oscilogram průběhu PWM a výstupního signálu nf koncového zesilovacího stupně .....        | 51 - |
| Obr. 5.10:  | Předpokládaná frekvenční charakteristika LC filtru nf koncového zesilovacího stupně ..... | 52 - |
| Tab. 5.11:  | Tabulka dalších naměřených parametrů koncového zesilovacího stupně .....                  | 52 - |
| Graf. 5.12: | Graf závislosti účinnosti zařízení na výstupním výkonu .....                              | 52 - |
| Obr. 5.13:  | Modulová frekvenční charakteristika LC filtru spínaného napájecího zdroje .....           | 53 - |
| Obr. 5.14:  | Oscilogram zatíženého výkonového napájecího napětí zdroje .....                           | 53 - |

# 1. Úvod

Tato práce úzce souvisí a zároveň navazuje na předchozí první a druhý semestrální projekt. Cílem prvního semestrálního projektu bylo zmapování všech existujících tříd spínačových výkonových nízkofrekvenčních zesilovačů, jejich následné srovnání a ověření dostupnosti těchto tříd v integrované podobě. V následujícím druhém semestrálním projektu byl na základě prvního projektu proveden výběr konkrétního koncového nízkofrekvenčního spínačového koncového zesilovacího stupně včetně výběru vhodného napájecího zdroje a korekčního předzesilovače dle zadání. Při výběru jednotlivých komponent byl kladen důraz na kvalitní parametry zařízení jako celku s využitím nejmodernějších komponentů a zároveň také na snížení celkových nákladů na zařízení. V úvahu byly také brány možnosti pozdějšího rozšíření např. o dálkové ovládání. Dle tohoto výběru byl zpracován ideový návrh celého zařízení a dále pak návrhy desek plošných spojů v programu Eagle. Dokončení druhého projektu spočívalo ve výrobě desek plošných spojů.

Cílem této navazující práce je zhotovení funkčního vzorku spínačového nf zesilovače, jako samostatně pracujícího celku, na základě předchozích vypracovaných podkladů s následným měřením základních vlastností tohoto vzorku a srovnáním se simulacemi v programu Pspice a katalogovými údaji výrobců. Součástí dalšího textu jsou proto zpracované předchozí projekty a jejich úpravy na základě získaných poznatků při ožívání zařízení. Dále zde budou rozvedeny konstrukční návrhy o detaily nutné pro konstrukce cívek všech LC filtrů a impulsního transformátoru pro spínaný napájecí zdroj. Objeví se zde také využití návrhového programu pro spínaný napájecí zdroj PXIs expert. Následovat bude také návrh a konstrukce vhodného Šasi pro zařízení a shrnutí celkových vynaložených nákladů na zařízení. Při výběru vhodného materiálu pro Šasi bude brán zřetel na moderní provedení zařízení, dosažení co nejnižší hmotnosti zařízení a zároveň na nízkou cenu. Nakonec se budeme zabývat výsledky měření na zařízení a jejich porovnáním s údaji udávanými výrobcí jednotlivých komponentů a v našem případě omezeným srovnáním se simulacemi v programu Pspice. Omezení srovnání se simulacemi spočívá v neexistenci modelů drtivě většiny využitých komponentů. Závěrem budou shrnuty výsledky práce a jejich celkové zhodnocení.

## 1.1 Problematika spínačových zesilovačů

Je jistě zřejmé, že společně se zavedením spínačové technologie do výkonové nf elektroniky, vznikla nová generace nf zesilovačů, zcela odlišná od předchozích technologií. Jedná se již o třetí generaci technologie zesílení nf signálu a najde se jistě mnoho jejich příznivců i odpůrců. Jelikož se však jedná o poměrně mladou záležitost, která ještě podléhá vývoji, dochází k neustálému zdokonalování jednotlivých parametrů a topologie obvodů těchto zesilovačů, což dává vzniknout novým třídám spínačových zesilovačů, se stále kvalitnějšími parametry. Bylo by velmi obtížné srovnávat jednotlivé generace zesilovačů podle všeobecného kritéria. Každá z nich má totiž velmi odlišné dílčí parametry, které mohou být každým posluchačem či konstruktérem jinak hodnoceny. U elektronkových zesilovačů může být preferován jejich specifický zvuk, u tranzistorových zesilovačů to může být zase velmi malé zkreslení a u spínačových například vysoká účinnost. Tudíž taková hodnocení mohou být velmi individuální. Ovšem srovnání parametrů jednotlivých tříd jedné generace, již není tak subjektivní.

Spínačové výkonové nf zesilovače pracují na zcela jiném principu než předešlé generace zesilovačů. Hlavním principem jejich činnosti je pulzně šířková modulace (dále PWM – pulse width modulation), díky níž mohou koncové tranzistory pracovat ve spínaném režimu. To znamená, že tranzistory nepracují v lineárním režimu jako řízené odpory, ale pracují pouze ve dvou stavech a to:

- tranzistor úplně otevřen => minimální odpor
- tranzistor úplně uzavřen => maximální odpor

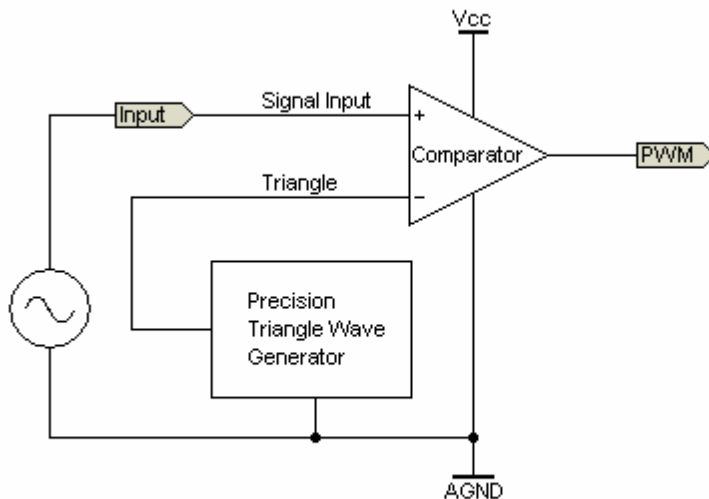
Ze spínaného režimu tranzistorů vyplývá právě velmi vysoká účinnost (teoreticky 100%) a tím i značná miniaturizace koncového stupně. Nedochozí zde totiž k přeměně nevyužitě energie na teplo, které by muselo být odváděno chladičem, mnohdy velkých rozměrů.

Spínání tranzistorů probíhá s kmitočtem řádově stovek kHz. Takovýmto kmitočtům a právě spínanému režimu vyhovuje nejlépe technologie CMOS. Spínací kmitočet však zůstává součástí výstupního, již zesíleného nf signálu, z čehož vyplývá značně vyšší zkreslení signálu, než je tomu například u tranzistorových zesilovačů. Jednotlivé třídy spínačových zesilovačů se liší převážně způsobem odstranění spínacího kmitočtu a tím i snížením zkreslení.

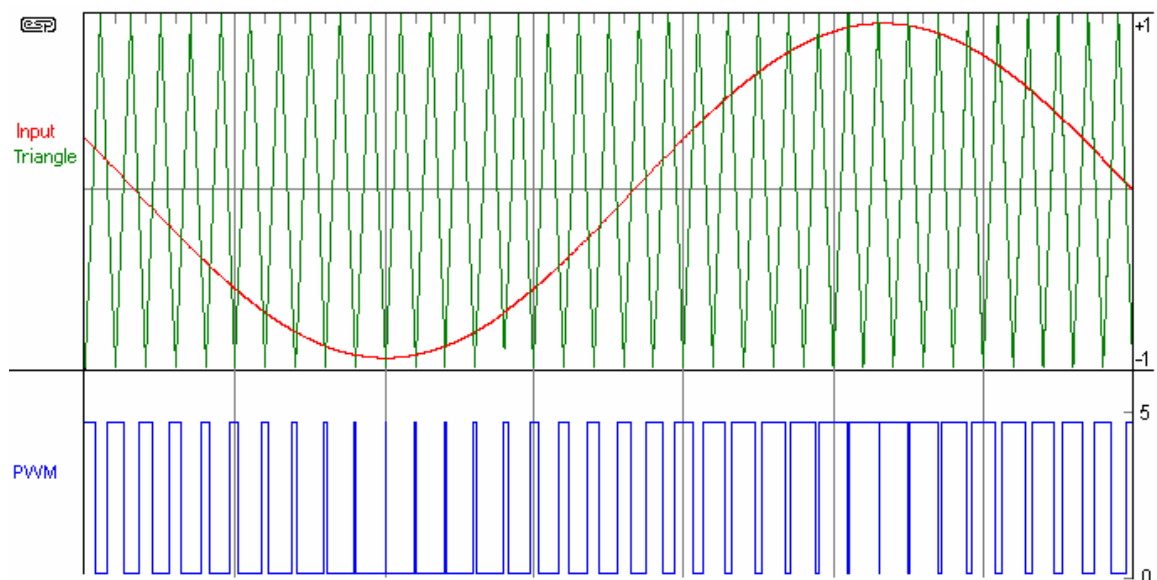
## 1.2 Popis jednotlivých tříd spínačových zesilovačů

### 1.2.1 Pracovní třída D

Tato třída je základem všech spínačových zesilovačů. Základním principem této pracovní třídy je pulzně šířková modulace (PWM), její činnost znázorňuje blokové schéma na obr.1.1. PWM modulátor se skládá z generátoru trojúhelníkového signálu (precision triangle wave generator ve schématu), jehož výstupní signál je v komparátoru porovnáván se vstupním nízkofrekvenčním signálem, výsledkem je pak pulzně šířkově modulovaný signál nesoucí nízkofrekvenční informaci v šířce jednotlivých pulzů, jak představuje obr1.2.

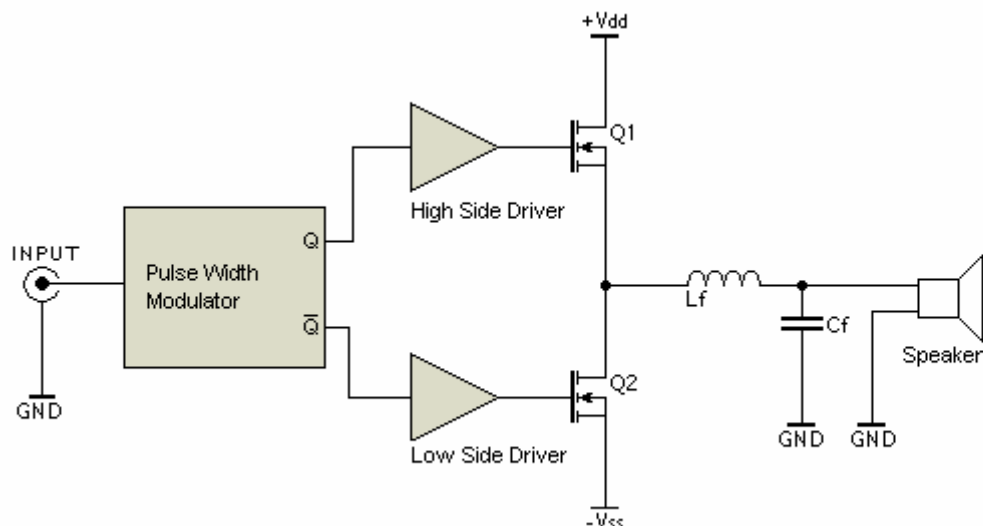


Obr.1.1: Blokové schéma PWM modulátoru



Obr.1.2: Princip PWM modulátoru

Tento PWM signál dále spíná výstupní MOSFET tranzistory zapojené obvykle v push-pull režimu. Topologii zapojení třídy D znázorňuje obr.1.3. Výsledkem spínání výstupních tranzistorů řízených PWM signálem je pak zesílená vstupní nízkofrekvenční informace obsahující složku o frekvenci spínacího kmitočtu. Ta musí být odstraněna výstupním LC filtrem, zapojeným jako integrační článek, který plní funkci dolní propusti, na jejímž výstupu je pouze zesílený audio signál zbavený spínacího kmitočtu.



Obr.1.3: Principiální schéma třídy D

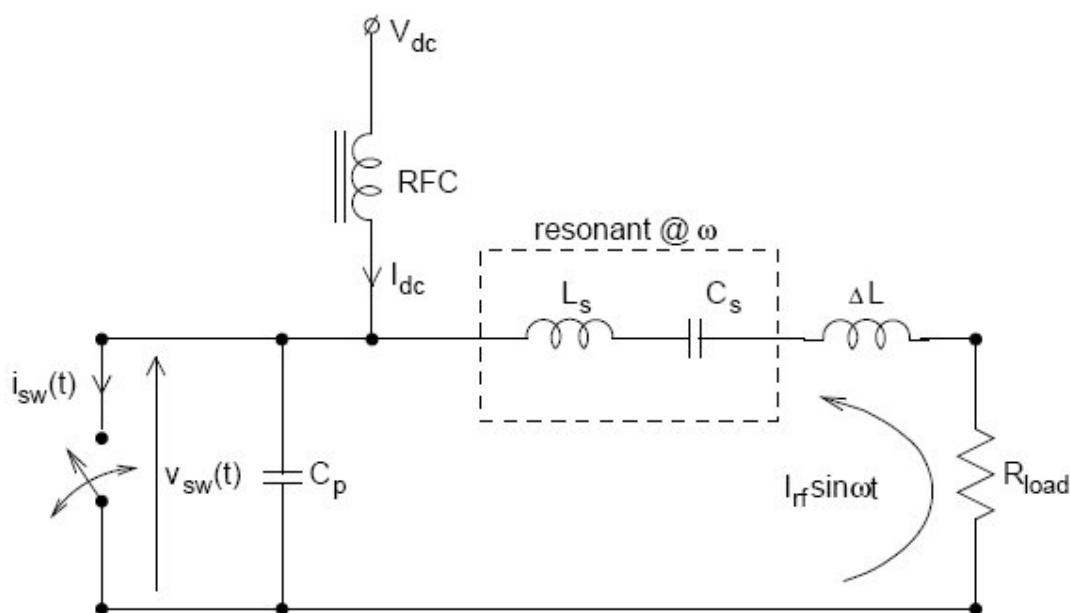
Pracovní třída D je mezi světovými výrobci velmi rozšířena a velmi rychle prorůstá do komerčních audio přístrojů, např. společnost SONY vyrábí tyto zesilovače pod označením S-master. Panasonic používá tuto pracovní třídu převážně v přenosných audio přehrávačích, ale i v domácí audiotechnice, jako D.amplifier, dosahující velmi dobrých zvukových vlastností. Je však i mnoho výrobců, kteří se zabývají výrobou a prodejem samotných čipů či driverů zesilovačů ve třídě D (Texas Instruments, Philips, Analog device, SANYO). Parametry těchto zesilovačů závisí na mnoha dílčích aspektech, jako je topologie obvodu, kvalita provedení výstupního filtru atd. Tyto parametry se pak u jednotlivých výrobců liší. Běžně však tyto zesilovače dosahují účinnosti nad 80%, zkreslení THD+N pod 1% a odstup signál-šum S/N 60dB, ale tyto údaje jsou opravdu velmi zavádějící (např. Philips uvádí u svých čipů THD+N 0,5%).

Mezi velké výhody této pracovní třídy patří její poměrně velká účinnost a dostupnost na trhu, protikladem toho je však poměrně velké zkreslení, které se nachází na hranici dnešních požadavků na kvalitní zpracování audio signálu.

## 1.2.2 Pracovní třída E

Jedná se o velmi specifickou třídu zesilovačů a to proto, že vstupním signálem těchto zesilovačů nemusí být sinusový signál, ale může to být i obdélníkový signál v závislosti na modifikaci obvodového zapojení. Na výstup spínacího tranzistoru, již není připojen dolnofrekvenční filtr, ale sériový laděný LC oscilátor. Jedná se tedy prakticky o generátor sinusového signálu řízený spínacím signálem.

Princip činnosti je znázorněn na obr.1.4., kde napájecí napětí je přivedeno přes tlumivku RFC na sběrný kondenzátor  $C_p$ , jehož napětí je řízeno spínačem. Na sběrný kondenzátor je pak připojen laděný rezonanční obvod  $L_s$ ,  $C_s$  a přizpůsobovací cívka. Vlivem řízení spínačem se pak na zátěži  $R$  objeví harmonické kmitů.



Obr.1.4: Principiální schéma třídy E

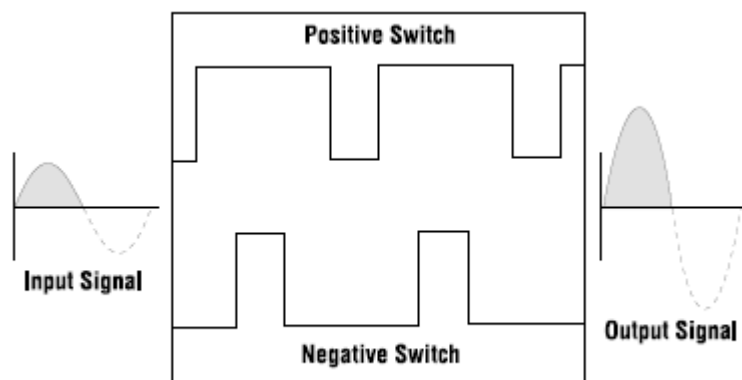
### 1.2.3 Pracovní třída F

Tato třída je označována také jako Biharmonická, nebo Polyharmonická a principiálně je shodná s třídou E, pouze s tím rozdílem, že výstupní obvod je složen z více laděných rezonančních obvodů, které vytvářejí vyšší sudé harmonické složky. Tyto vyšší harmonické jsou u zesilovačů ve třídě D zcela potlačeny výstupním LC filtrem.

Poznámka: Princip zesilovačů ve třídě E a F je využíván převážně pro zpracování vysokofrekvenčních signálů, v audio technice se využívá velmi zřídka, proto zde nejsou uvedeny ani parametry těchto tříd. Princip těchto tříd se ovšem dá také implementovat jako úprava výstupního filtru zesilovače ve třídě D.

### 1.2.4 Pracovní třída I

Tato pracovní třída je patentem společnosti Crown [12] zabývající se výrobou audio zesilovačů vysokých výkonů. Tyto zesilovače využívají technologii BCA (Balanced current amplifier), která je základním principem této třídy. Jedná se o symetrickou (negativní a pozitivní) PWM modulaci, která řídí výstupní CMOS tranzistory v zapojení push-pull, jak znázorňuje obr.1.5. Pomocí tohoto systému je možné spolehlivě spínat tranzistory frekvencí 250kHz, přičemž je signál celkově spínán efektivněji frekvencí 500kHz. To umožňuje lepší využití reaktivní energie vracející se ze zátěže (reproduktoru) zpět do zesilovače, než u zesilovačů ve třídě D. Vyšší spínací frekvence navíc dovoluje použití efektivních výstupních filtrů neposouvajících fázi.



Obr. 1.5: Princip činnosti pracovní třídy I

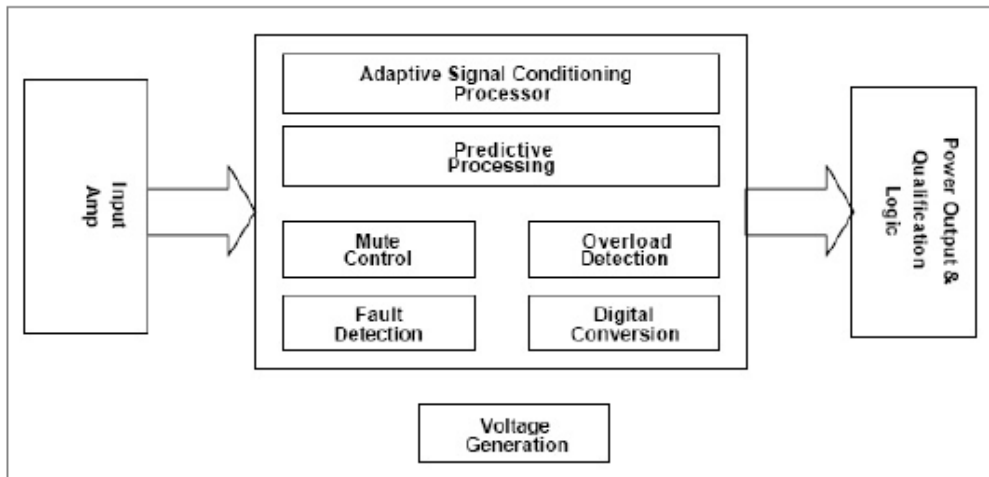
Pracovní třída I díky technologii BCA dosahuje velmi vysoké účinnosti, větší než 90% a velmi dobrý poměr S/N, větší než 100dB. Zkreslení THD+N uvádí výrobce menší než 0,5%, ovšem při výstupním výkonu 200W - 1600W, což se dá při tak velkých výkonech pokládat za velmi dobrou hodnotu.

### 1.2.5 Pracovní třída S

Touto třídou se dnes označují zesilovače, které za pomoci moderních digitálních metod zpracování a velmi vysokých spínacích kmitočtů již nepotřebují na svém výstupu LC filtr ve funkci dolní propusti k potlačení spínacího kmitočtu a dalších produktů spínání (tzv. filterless zesilovače). Tato třída je však v audio technice velmi málo rozšířena a lze o ní prozatím získat velmi málo informací, proto zde nejsou uvedeny ani typické parametry této třídy.

### 1.2.6 Pracovní třída T

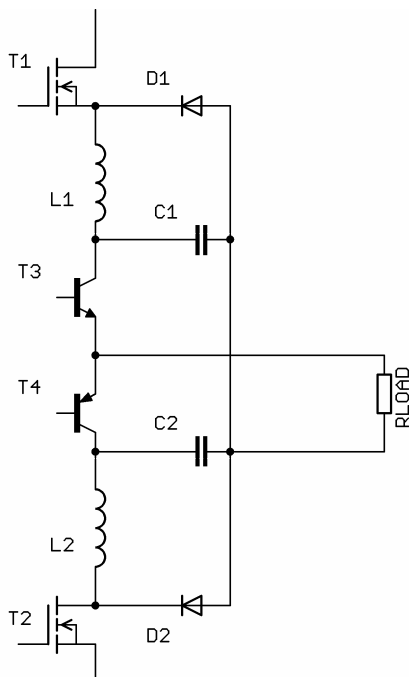
Tato pracovní třída pochází z dílny společnosti Tripath technology [13], jenž u svých spínačových zesilovačů v této třídě dosáhla výborných parametrů a to: účinnost až 90%, zkreslení menší než 0,1% a odstup signál-šum větší než 95dB. Takových parametrů bylo dosaženo především zvýšením spínacího kmitočtu, propracovaným algoritmem řízení zpětné vazby, kterou provádí procesor. Blokové schéma principu činnosti třídy T znázorňuje obr.1.6. Tato třída již obsahuje principy jak analogového tak digitálního zpracování adaptivními a prediktivními algoritmy. Jedná se o tzv. DPP technologii (Digital power procesing). Zesilovače firmy Tripath jsou důkazem, že lze i u spínačových zesilovačů dosáhnout velmi dobrých parametrů a jsou dostupné na trhu jako jednočipové zesilovače, nebo jako drivery externích tranzistorů. Ovšem konstrukce těchto zesilovačů sebou může nést značná rizika snížení kvality parametrů zesilovače vlivem parazitních kapacit, indukčností na DPS a nevhodnou volbou součástek výstupních filtrů (materiál jádra cívky).



Obr.1.6: Princip činnosti třídy T

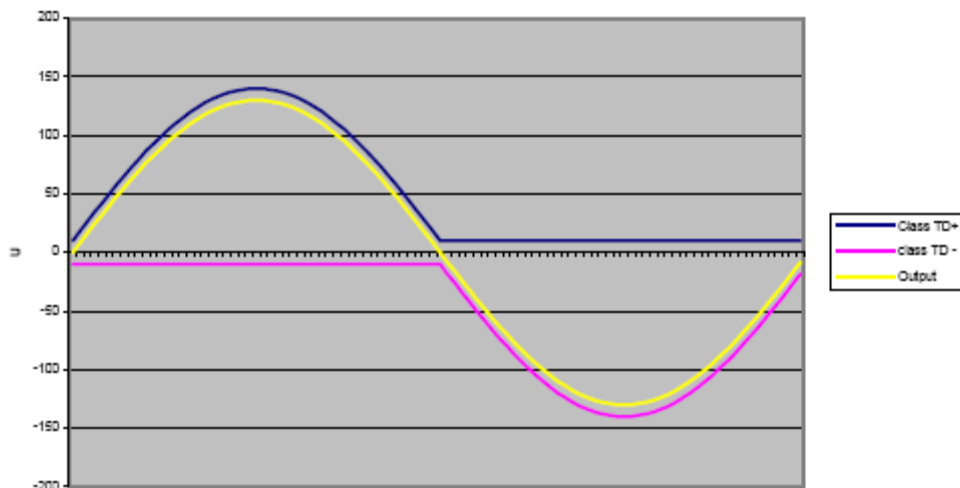
### 1.2.7. Pracovní třída TD:

Tato třída je patentem společnosti LAB.GRUPPEN [14] a využívá ke své činnosti spojení pracovní třídy A, AB nebo B společně s třídou D. Zesilovače třídy TD proto dosahují velmi vysokých výkonů, malého zkreslení a vysoké účinnosti.



Obr.1.7: Principiální schéma třídy TD

Část zesilovače pracující ve třídě A, AB nebo B plní funkci tzv. aktivního výstupního filtru koncového stupně pracujícího ve třídě D, jak znázorňuje obr.1.7. Koncový stupeň třídy např. B tedy pracuje v lineárním režimu a je napájen z výkonového stupně D, toto „napájecí“ napětí tedy přesně sleduje průběh zesilovaného signálu (obr.1.8.) a tím je dosaženo velké účinnosti až 85% a jelikož tyto zesilovače prakticky pracují v lineárním režimu, je zcela odfiltrován vliv spínací frekvence stupně ve třídě D a je tak dosaženo zkreslení THD+N 0,1%.

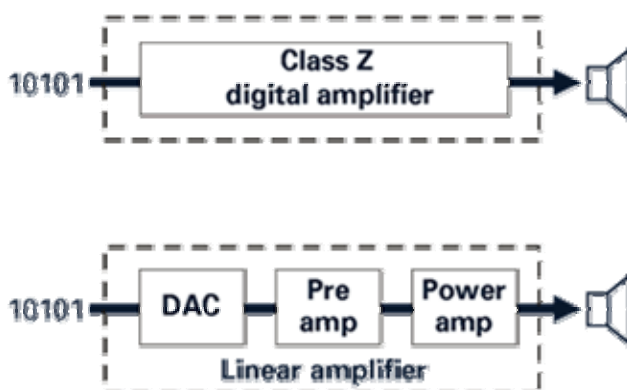


Obr. 1.8: Oscilogram činnosti třídy TD

Dále je u zesilovačů třídy TD udáván poměr signál-šum až 112dB. Společnost LAB.GRUPPEN se specializuje na výrobu zesilovačů velmi vysokých výkonů určených pro profesionální ozvučování a i při výkonech až několik tisíců wattů si tyto zesilovače zachovávají velice dobré parametry.

### 1.2.8. Pracovní třída Z

Touto velice ambiciózní pracovní třídou se pyšní společnost Zetex [15]. Ambiciózní proto, že se tvůrcům této třídy za pomoci vysoké integrace a důkladně propracovaných algoritmů digitální řízené zpětné vazby podařilo dosáhnout zkreslení THD+N menší než 0,004% a to v rozsahu výstupních výkonů od 1W až po 250W, v celém akustickém pásmu. Tato třída již nepracuje s analogovým vstupním signálem ale přímo s jeho digitální podobou (obr.1.9.), proto tuto třídu jako jedinou můžeme zařadit skutečně do digitálních zesilovačů.



Obr. 1.9: Princip pracovní třídy Z.

Tato vlastnost zpracovávání digitálního signálu může být v mnoha ohledech značnou výhodou. Obrovskou perspektivou této pracovní třídy je fakt, že v dnešní době jsou již analogové záznamy téměř vytlačeny záznamy digitálními a vývojem nových metod digitalizace a hustoty vzorkování bylo již dosaženo velmi vysokých kvalit digitálního záznamu (HD audio). Již mnoho komerčních zařízení je vybaveno digitálními výstupy jak videa, tak i audia. Přenos audio signálu v digitální podobě je navíc mnohem méně náchylný na rušení vnějším elektromagnetickým polem než analogový signál. Tato třída jistě najde obrovské

využití v domácím HI-FI audio, jako součást přehrávačů optických disků, nebo systémů minidisku a to hlavně proto, že zde odpadá nutnost přítomnosti D/A převodníků.

Doplníme-li tuto třídu kvalitním vstupním A/D převodníkem, může být použita i pro zpracování analogového signálu. Tato možnost nalezne jistě celou řadu odpůrců digitalizace zvuku, ale i přesto bude mít takový zesilovač parametry srovnatelné, ne-li převyšující parametry lineárních zesilovačů. Společnost Zetex navíc tvrdí, že jejich zesilovače ve třídě Z vynikají svou specifickou barvou zvuku a čistotou hlubokých i vysokých tónů.

### 1.3. Srovnání pracovních tříd

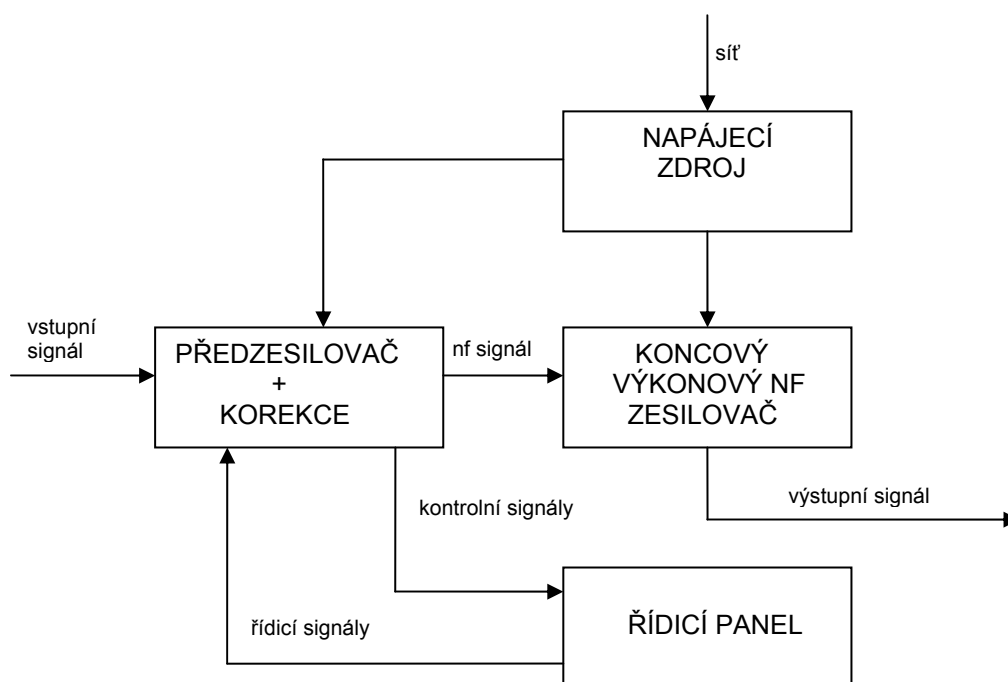
Rozdíly mezi parametry jednotlivých tříd jsou velmi zřejmé z níže uvedené tabulky. Velmi dobrých parametrů dosahují zesilovače třídy T, TD a Z. Tyto třídy se svými vlastnostmi velmi blíží vlastnostem lineárních zesilovačů. Třída I, spolu s třídou TD, převyšuje mnohonásobně ostatní třídy svými výstupními výkony a třída D je výrazná svou dostupností na trhu. Každá z uvedených tříd má tedy své specifické pro a proti, a záleží už individuálně na každém, jakým vlastnostem dá přednost.

| p. třída | vstupní signál | odstup S/N | účinnost | THD+N   | dostupnost  | výst. výkon       |
|----------|----------------|------------|----------|---------|-------------|-------------------|
| D        | analog         | 60dB       | 80%      | <1%     | IO,přístroj | jednotky-stovky W |
| E,F      | Dle modifikace | N/A        | N/A      | N/A     | N/A         | N/A               |
| I        | analog         | >100dB     | >90%     | <0,5%   | Přístroj    | 200W-1600W        |
| S        | analog         | N/A        | N/A      | N/A     | N/A         | N/A               |
| T        | analog         | >95dB      | 90%      | <0,1%   | IO          | 10W-250W          |
| TD       | analog         | 112dB      | 85%      | 0,10%   | Přístroj    | 200W-6000W        |
| Z        | digital        | N/A        | N/A      | <0,004% | IO          | 1W-250W           |

Tab.1.10: Tabulka srovnání parametrů jednotlivých tříd

## 2. Ideový návrh nízkofrekvenčního výkonového spínačového zesilovače

### 2.1. Volba metody realizace projektu



Obr2.1: Blokové schéma realizace projektu

#### 2.1.1. Účel zařízení

Konečný celek, jakožto výkonový nízkofrekvenční spínačový zesilovač, bude používán jako domácí stereo systém a pro ozvučení malých společenských událostí ve spojení s vhodným zdrojem audio signálu. Z uvedených aplikací plyne požadavek na kvalitní parametry pro domácí poslech a zároveň dostatečný výstupní výkon pro ozvučení společenských událostí.

## 2.2. Volba vhodných komponentů nf zesilovače

### 2.2.1. Předzesilovač + korekce

Dle zadání projektu má být zesilovač vybaven korekcemi nízkých a vysokých tónů a dle aplikačního požadavku musí být možné nastavení poměru hlasitosti mezi pravým a levým kanálem, tedy nastavení balance. Nezbytnou součástí je také nastavení hlasitosti. Diskrétní řešení takového předzesilovače by bylo značně složité, neefektivní a drahé. Proto jsem se rozhodl pro realizaci předzesilovače s audioprocesorem, jenž se dnes vyrábí v pestré škále. Rozhodl jsem se pro použití audioprocesoru společnosti Princeton Technology s označením PT2317B. Tento typ je uložen v pouzdře DIL28 a je vybaven funkcemi nastavení hlasitosti, hlubokých tónů, vysokých tónů, balance, fader a funkcí LOUDNESS. Funkce LOUDNESS je založena na principu vnímání různých tónů v závislosti na jejich hlasitosti. Konkrétně je lidské ucho při nízkých hlasitostech mnohem méně citlivé na hluboké a vysoké tóny, což je vykompenzováno právě funkcí LOUDNESS. Ve výčtu funkcí obvodu je uvedena také funkce fader, což je možnost nastavení poměru hlasitosti mezi dvojicí stereofonních kanálů. Obvod totiž obsahuje dva stereofonní výstupy při jednom stereofonním vstupu. Jedním z těchto výstupů bude napájen koncový zesilovací stupeň, přičemž druhý výstup bude vyveden na konektory cinch zabudované na zadním panelu přístroje, ke kterým bude možné připojit například další stereofonní zesilovač, nebo společný basový kanál. Další výjimečnou vlastností obvodu PT2317 je ovládání všech funkcí pouze čtyřmi řídicími signály bez nutnosti použití mikrokontroléru. Jedním z řídicích signálů je ovládána funkce loudness, druhým jsou voleny ostatní funkce systému a poslední dva slouží k inkrementaci či dekrementaci úrovně zvolené funkce. Funkce loudness bude ovládána samostatným tlačítkem a ostatní funkce budou řízeny dnes již běžně dostupným rotačním kodérem se zabudovaným tlačítkem, jímž bude ovládána volba funkce. Pro přehlednost ovládání je audioprocesor vybaven pětistupňovým LED indikátorem a indikací funkce LOUDNESS.

### 2.2.2. Koncový zesilovací stupeň

Tato součást je jádrem celého zařízení, proto byl na výběr vhodného řešení kladen obzvláště velký důraz. V prvním projektu této práce byly již uvedeny jednotlivé pracovní třídy, jimiž jsou spínačové zesilovače charakterizovány. Jako možnou variantu řešení jsem také uvedl třídu T od společnosti Tripath. Ovšem za krátkou dobu se právě společnost Tripath dostala do konkurzu a již pouze doprodávají své skladové zásoby. Od této volby jsem tedy upustil, jelikož již není až tak perspektivní. Při hledání nové formy realizace jsem narazil na článek, v němž je uvedeno, že společnost SANYO odkoupila od firmy Tripath patent technologie DPP (digital power processing) [1], což je technologie digitálního řízení zpětné vazby adaptivními a prediktivními algoritmy. Tento článek mě značně zaujal a později jsem našel i mezi produkty SANYO hybridní integrované obvody pro nf zesilovače třídy D, jenž se vyznačují velice dobrými parametry při poměrně velkém výstupním výkonu. Mezi obvody společnosti SANYO jsem zvolil STK428-610, jenž disponuje výstupním výkonem 2x70W při zátěži 4Ω a harmonickým zkreslením menším než 0,1% až do 70% výstupního výkonu. Tento obvod ovšem na našem trhu není k sehnání, proto musel být objednan z U.S.A. Hybridní technologie umožňuje minimalizaci externích součástek, a tím i vznik zkreslení vlivem parazitních parametrů plošného spoje a pasivních součástek. Obvod STK 428-610 ještě není vybaven technologií DPP, ale i přesto je z hlediska parametrů a konstrukce velmi perspektivní. STK428-610 obsahuje také synchronizaci s AM tunerem, jelikož jeho vlastní spínací frekvence je 420-500kHz, tedy pohybující se v pásmu vysílání AM modulací. Tato funkce však v návrhu nebude využita a bude zablokována. Obvod dále obsahuje různé druhy ochran, jako je ochrana proti přepětí, tepelná ochrana obvodu apod.

### 2.2.3. Napájecí zdroj

Napájecí zdroj je třetí nejdůležitější částí zařízení. Musí být navržen s naprostou precizností, protože může do zesíleného nf signálu zanášet velmi nepříjemný síťový brum, a to převážně zemnicími smyčkami vznikajícími např. při propojení se zdrojem nf signálu nevhodně dlouhým kabelem. Zesilovač by mohl být napájen toroidním transformátorem s vhodně navrženým usměrňovačem a filtrací. Ovšem vybraný koncový zesilovací stupeň vyžaduje oddělené napájení řídicích obvodů a power stage (výkonového stupně), přičemž každé z těchto napájení je symetrické. Bylo by proto potřeba čtyř sekundárních vinutí transformátoru, což vyžaduje výrobu na zakázku. Další nevýhodou tohoto řešení je velký rozměr usměrňovače a filtru, jelikož by při výstupním výkonu 2x70W musely být použity velké kapacity filtru. Ideálním řešením napájení je proto spínaný zdroj. Již i na našem trhu je k dostání celá řada řídicích obvodů spínaných zdrojů i ostatních obvodových prvků. Konstrukce zdroje tím bude značně složitější, ovšem jeho rozměry, hmotnost i cena se výrazně sníží. Nejpodstatnější výhody spínaného zdroje však spočívají ve vlastním principu činnosti, kdy síťové napětí je nejdříve usměrněno, vyhlazeno a po té je spínáno pomocí pulzně šířkové modulace a transformováno podle potřeby. Výstupní napětí takového zdroje proto obsahuje střídavou složku o frekvenci spínání zdroje, jenž leží zcela mimo slyšitelné pásmo. Navíc při použití kvalitně odizolovaného feritového transformátoru lze použít dvouvodičový síťový přívod, čímž je zcela eliminován vznik zemnicích smyček. Společnost Power Integration vyrábí celou řadu řídicích obvodů pro spínané zdroje při minimalizaci externích součástí. Spínací frekvence těchto obvodů je 130kHz, čímž je minimalizován také rozměr transformátoru. Na internetových stránkách Power integration jsou také volně dostupné návrhové programy zdrojů. Pro návrh zdroje jsem využil knihu Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch [7].

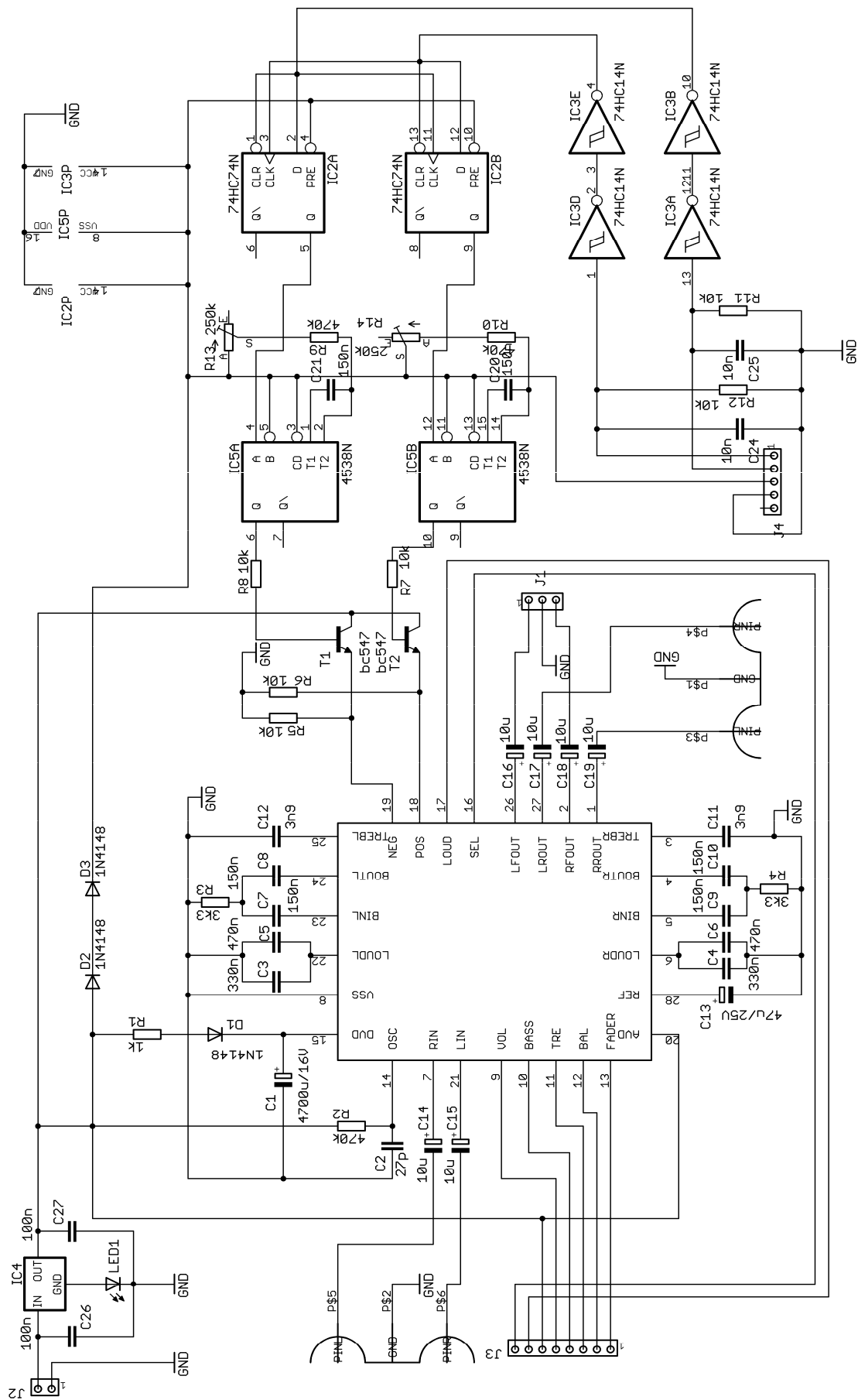
## 3. Řešení komponentů zesilovače

### 3.1. Předzesilovač s korekcemi a ovládací panel

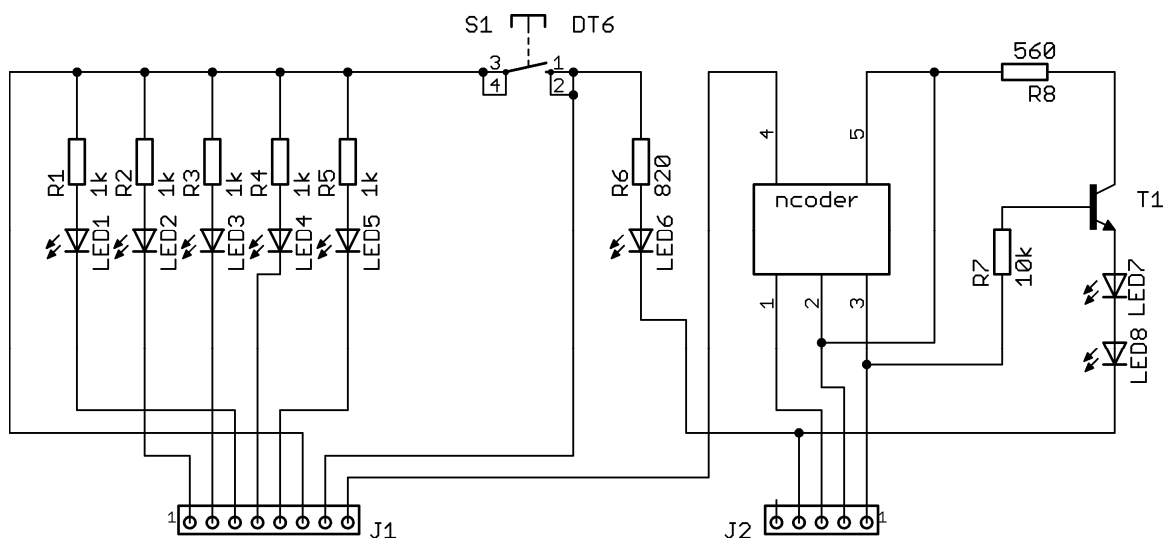
Jak již bylo řečeno jádrem předzesilovače je obvod PT2317B [6]. Tento obvod pracuje na bázi technologie CMOS a i přesto, že tento obvod není zcela analogový, vyznačuje se poměrně dobrými parametry. Harmonické zkreslení výstupního signálu by mělo být menší než 0,1%. Tento údaj je ovšem jediným, který výrobce udává, proto bude při závěrečném měření, sestrojena křivka THD+N v závislosti na kmitočtu a úrovni hlasitosti.

#### 3.1.1. Popis zapojení základní desky předzesilovače

Na obr.3.1. je znázorněno schéma vlastního zapojení předzesilovače. Obvod PT2317B vyžaduje jmenovité napájecí napětí 6V v rozmezí  $\pm 1V$ . Pro spolehlivou činnost obvodu je proto napětí stabilizátoru 7805 zvýšeno LED diodou zapojenou sériově v zemním vývodu stabilizátoru. Vývod DVD obvodu PT2317B je napájecím pinem digitální části obvodu. Pro zachování nastavených úrovní jednotlivých funkcí i po vypnutí přístroje je proto paralelně k tomuto pinu zapojen zálohovací kondenzátor C1 při oddělení od ostatních obvodů diodou D1. Při kapacitě zálohovacího kondenzátoru 2200uF se uchovávají nastavené funkce déle než jeden týden. Člen R2, C2 nastavuje oscilační kmitočet obvodu, tj. rychlost reakce na řídicí signály a rychlost nastavování jednotlivých funkcí. Externími kondenzátory nebo RC členy na vývodech TREB, BOUT, BIN a LOUD se nastavují lomové kmitočty nastavitelného ekvalizéru a funkce loudness. Hodnoty těchto prvků jsou zvoleny dle doporučení výrobce. Vývody VOL, BASS, TRE, BAL, FADER jsou určeny k připojení kontrolních LED diod, jak ukazuje na obr.3.2. schéma zapojení ovládacího panelu. Tyto LED diody pak tvoří patnáctistupňový indikátor nastavené úrovně zvolené funkce, jelikož je navíc jas každé diody řízen ve třech stupních. Po zvolení některé z pěti nastavitelných funkcí obvodu se také rozsvítí příslušná LED dioda dané funkce a svítí až do počátku nastavování této funkce. Nf vstupy a výstupy obvodu jsou opatřeny oddělovacími kondenzátory o kapacitě 10uF. Řídicí signály jsou k obvodu připojeny přes piny POS, NEG, LOUD a SEL. Piny LOUD a SEL jsou vyvedeny zvlášť na ovládací panel, kde je funkce loudness ovládána tlačítkem S1 a volba funkce, tedy SELECT, je ovládána interním tlačítkem rotačního kodéru označeného jako n-coder. Otáčením rotačního kodéru jsou pak přiváděny kladné impulzy na tranzistory T1 a T2, jenž spínají piny POS a NEG v závislosti na směru otáčení, tedy jestli chceme hodnotu zvolené funkce zvětšovat či snižovat. Rotační n-kodér pracuje na principu dvou vzájemně posunutých spínacích kontaktů. Dekódovací logika pak rozpoznává směr otáčení n-kodéru podle toho, který ze dvou kontaktů je sepnut dříve. Jako dekodér jsem použil dvojici klopných obvodů D, na jejichž vstupech jsou zapojeny Schmidtovy klopné obvody tvarující impulzy přicházející od n-kodéru. V závislosti na tom, z kterého pinu přijde spínací impuls dříve, je jeden z klopných obvodů D zablokovaný a druhý nastaven, spolu s druhým impulzem je přepsána informace ze vstupu aktivního KO na jeho výstup. Výsledkem jsou pak kladné impulzy trvající přibližně 10ms. Na tak krátké impulzy však PT2317 není schopen reagovat, proto jsou mezi něj a DKO zařazeny ještě přesné monostabilní KO tvořeny IO 4538, jenž prodlužují impulzy na 100ms a jsou navíc řízeny vzestupnou hranou, tudíž je předcházeno zablokování n-kodéru v kladné úrovni, tedy hazardům obvodu. U prototypu předzesilovače byl místo obvodu 4538 použit dvojitý časovač 556, ten však reaguje pouze na úroveň a občasně docházelo při otáčení n-kodérem k zablokování obvodu, když na výstupech obou klopných obvodů se zároveň nastavily vysoké logické úrovně. Nf signál je k obvodu přiveden přes dvojici konektorů cinch. Audioprocesor, jak již bylo řečeno, má vzhledem k jednomu vstupnímu stereofonnímu kanálu dva výstupní kanály, jejichž hlasitost lze nastavit nezávisle na sobě. Jedním ze stereofonních výstupů bude napájen koncový stupeň a druhý bude vyveden na zadní panel přístroje s možností připojení např. dalšího stereofonního stupně a vytvoření kvadrofonní soustavy, nebo k ozvučení jiné místnosti.



Obr.3.1: Schéma zapojení předzesilovače s obvodem PT2317B



Obr. 3.2: Schéma zapojení ovládacího panelu

### 3.1.2. Popis zapojení kontrolního panelu

Svítlivé diody LED1 – LED5 jsou indikačními diodami nastavené úrovně dané funkce a zároveň indikací aktivní funkce spínačem S1 je nastavována funkce LOUDNESS, přičemž její aktivní stav je indikován led diodou LED6. Diody LED7 a LED8 indikují otočení rotačního n-kodéru o 1krok. Se základní deskou je kontrolní panel propojen konektory J1 a J2.

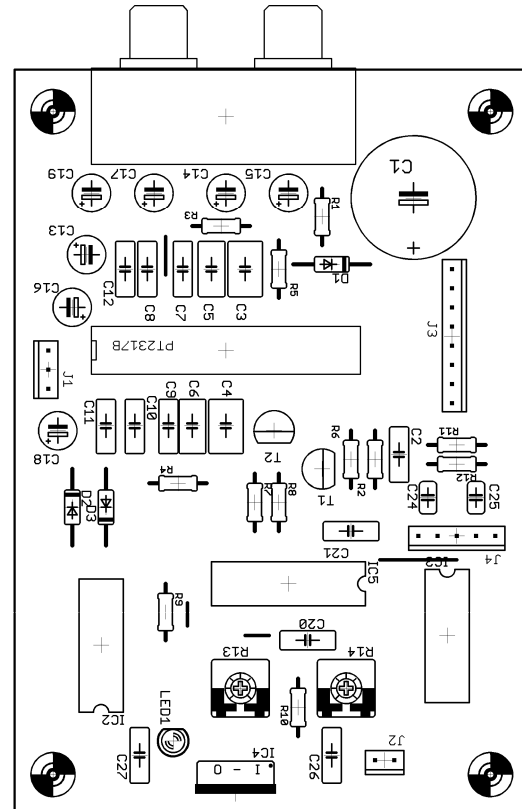
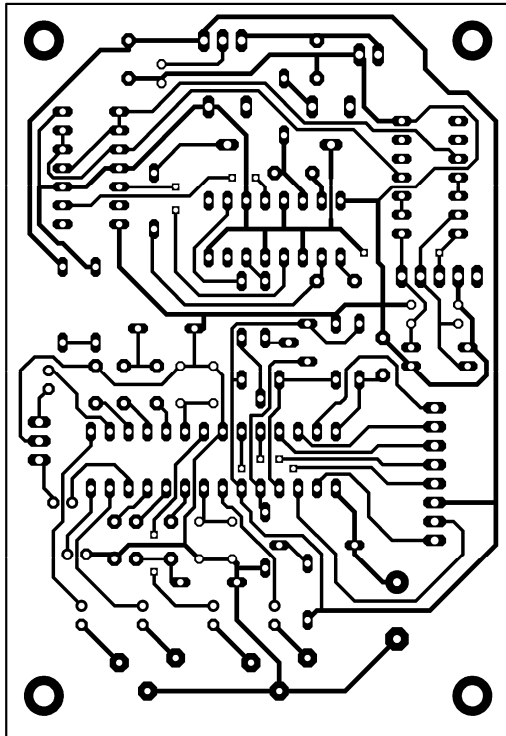
### 3.1.3. Předpokládané parametry předzesilovače

| Parametr               | Hodnota   | Jednotka   | Poznámka |
|------------------------|-----------|------------|----------|
| Napájecí napětí        | $6 \pm 1$ | V          |          |
| Typ. Nap. Proud        | 50        | mA         |          |
| Vstupní impedance      | 10        | k $\Omega$ |          |
| Výstupní impedance     | 100       | k $\Omega$ |          |
| THD                    | 0,1       | %          |          |
| Odstup signál šum      | 95        | dB         |          |
| Rychlost přeběhu       | 2         | V/ms       |          |
| Nastavení hlasitosti   | -68 až 0  | dB         | 32 kroků |
| Nastavení basů a výšek | -16 až 16 | dB         | 8 kroků  |
| Nastavení balance      | -80 až 0  | dB         | 9 kroků  |
| Nastavení fader        | -80 až 0  | dB         | 9 kroků  |

Tab.3.3: Tabulka předpokládaných parametrů předzesilovače

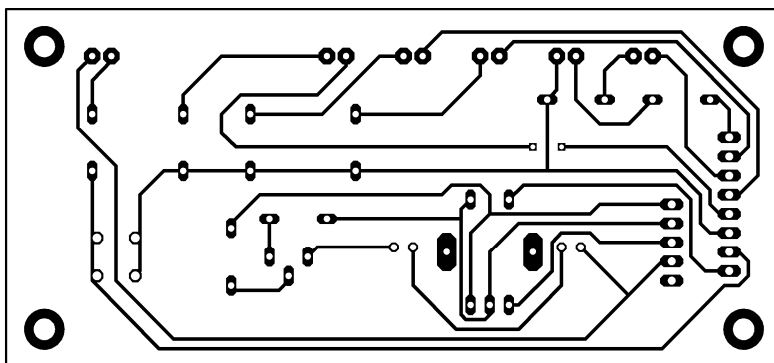
### 3.1.4. Návrh plošného spoje

Plošný spoj byl navržen jako jednostranný při minimalizaci rozměrů a dodržení co nejkratších signálových cest. DPS základní desky předzesilovače má rozměr 67x99mm a DPS řídicího panelu má rozměry 103x47mm.

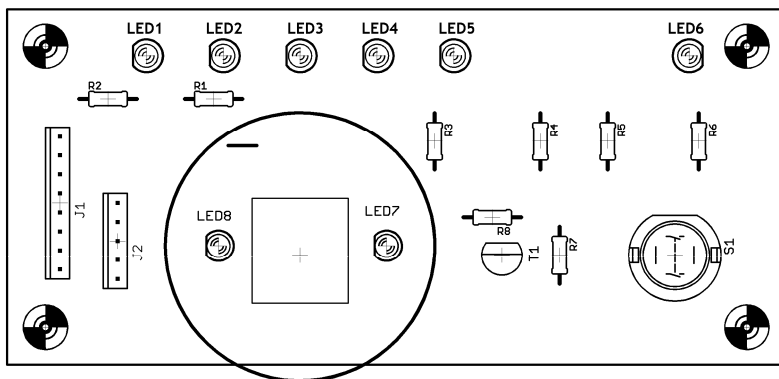


Obr.3.4:DPS základní desky předzesilovače

Obr.3.5:Rozmístění součástek z. desky



Obr.3.6: DPS řídicího panelu pro předzesilovač



Obr.3.7: Rozmístění součástek řídicího panelu předzesilovače

### 3.1.5. Seznam součástek předzesilovače

| Název         | Hodnota   | Poznámka | cena      |
|---------------|-----------|----------|-----------|
| C1            | 2200u/16V | elyt     | 11,00 Kč  |
| C2            | 27p       | ker.     | 1,20 Kč   |
| C2,C4         | 330n      | foliový  | 8,20 Kč   |
| C5,C6         | 470n      | foliový  | 11,00 Kč  |
| C7-C10        | 150n      | foliový  | 8,00 Kč   |
| C11,C12       | 3n9       | foliový  | 3,80 Kč   |
| C13           | 47u/25V   | elyt     | 2,70 Kč   |
| C14-C19       | 10u/50V   | elyt     | 1,60 Kč   |
| C20,C21       | 150n      | ker.     | 3,00 Kč   |
| C24,C25       | 10n       | ker.     | 2,80 Kč   |
| C26,C27       | 100n      | ker.     | 3,00 Kč   |
| D1-D3         | 1N4148    |          | 3,00 Kč   |
| J1            | PSS254/03 |          | 1,50 Kč   |
| J2            | PSS254/02 |          | 1,20 Kč   |
| J3            | PSS254/08 |          | 3,50 Kč   |
| J4            | PSS254/05 |          | 2,20 Kč   |
| J5            | 4xCINCH   | do DPS   | 24,00 Kč  |
| LED1          | LED3mm    | červená  | 2,40 Kč   |
| R1            | 1k        | 204      | 0,80 Kč   |
| R2            | 470k      | 204      | 0,80 Kč   |
| R3,R4         | 3k3       | 204      | 1,60 Kč   |
| R5-R8,R11,R12 | 10k       | 204      | 4,80 Kč   |
| R9,R10        | 470k      | 204      | 1,60 Kč   |
| R13,R14       | 250k      | 204      | 1,60 Kč   |
| T1,T2         | BC546     |          | 2,40 Kč   |
| IC1           | PT2317B   |          | 160,00 Kč |
| IC2           | 74HC74    |          | 5,50 Kč   |
| IC3           | 74HC14    |          | 6,20 Kč   |
| IC4           | 7805      |          | 7,20 Kč   |
| IC5           | 4538      |          | 10,90 Kč  |
| cena celkem   |           |          | 297,50 Kč |

Tab.3.8: Seznam součástek základní desky předzesilovače

| Název       | Hodnota   | Poznámka | cena     |
|-------------|-----------|----------|----------|
| J1          | PSS254/08 |          | 3,20 Kč  |
| J2          | PSS254/05 |          | 2,20 Kč  |
| LED1-LED5   | LED3mm    | zelená   | 12,00 Kč |
| LED6        | LED3mm    | žlutá    | 2,70 Kč  |
| LED7,LED8   | LED3mm    | červená  | 2,40 Kč  |
| R1-R5       | 1k        | 204      | 4,00 Kč  |
| R6          | 820       | 204      | 0,80 Kč  |
| R7          | 10k       | 204      | 0,80 Kč  |
| R8          | 560       | 204      | 0,80 Kč  |
| S1          | DT6       | tlačítko | 13,00 Kč |
| T1          | BC546     |          | 2,70 Kč  |
| cena celkem |           |          | 44,60 Kč |

Tab.3.9: Seznam součástek ovládacího panelu

## 3.2. Koncový nf zesilovací stupeň

Hybridní obvody výkonových zesilovacích nf stupňů ve třídě D byly pro výrobce SANYO vyvinuty společností Bang & Olufsen ICE power, jako řada STK428-600 series [3]. Vývojové středisko Bang & Olufsen se prezentuje vysoce jakostními spínačovými nízkofrekvenčními výkonovými zesilovači založenými na principu ICE power technology. Hybridní obvod STK428-610 je uložen v pouzdře s 28 vývody pro klasickou montáž. Tímto obvodem jsou vybaveny například multifunkční audio/video systémy výrobce JVC. Právě díky hybridní koncepci tento obvod obsahuje nejen výkonový zesilovací stupeň, ale i všechny řídicí obvody, včetně zpětných vazeb a PWM modulace vstupního signálu. Vyžaduje proto minimum externích součástek a díky tomu postačí jednostranná deska plošného spoje. Jak již bylo řečeno, tento obvod se vyznačuje velmi dobrými parametry, jenž při určitém rozsahu výstupního výkonu mohou být srovnatelné a pracovní třídou AB. V rozsahu výstupního výkonu 2x1W až 2x50W, což je výkon běžného domácího poslechu, by mělo být podle údajů výrobce zkreslení velmi malé, pohybující se okolo 0,1% [2]. Od 70% výkonu však zkreslení začíná prudce stoupat až k hodnotě 10%, což je obvyklou vlastností spínačových nf zesilovačů. Ovšem vzhledem k výkonu, při kterém k tomuto zkreslení dochází, již lidské ucho, vzhledem ke značné hlasitosti, na něj není schopno reagovat. Závislost udávaná výrobcem bude samozřejmě ověřena měřením na hotovém výrobku.

### 3.2.1. Návrh cívek výstupních LC filtrů

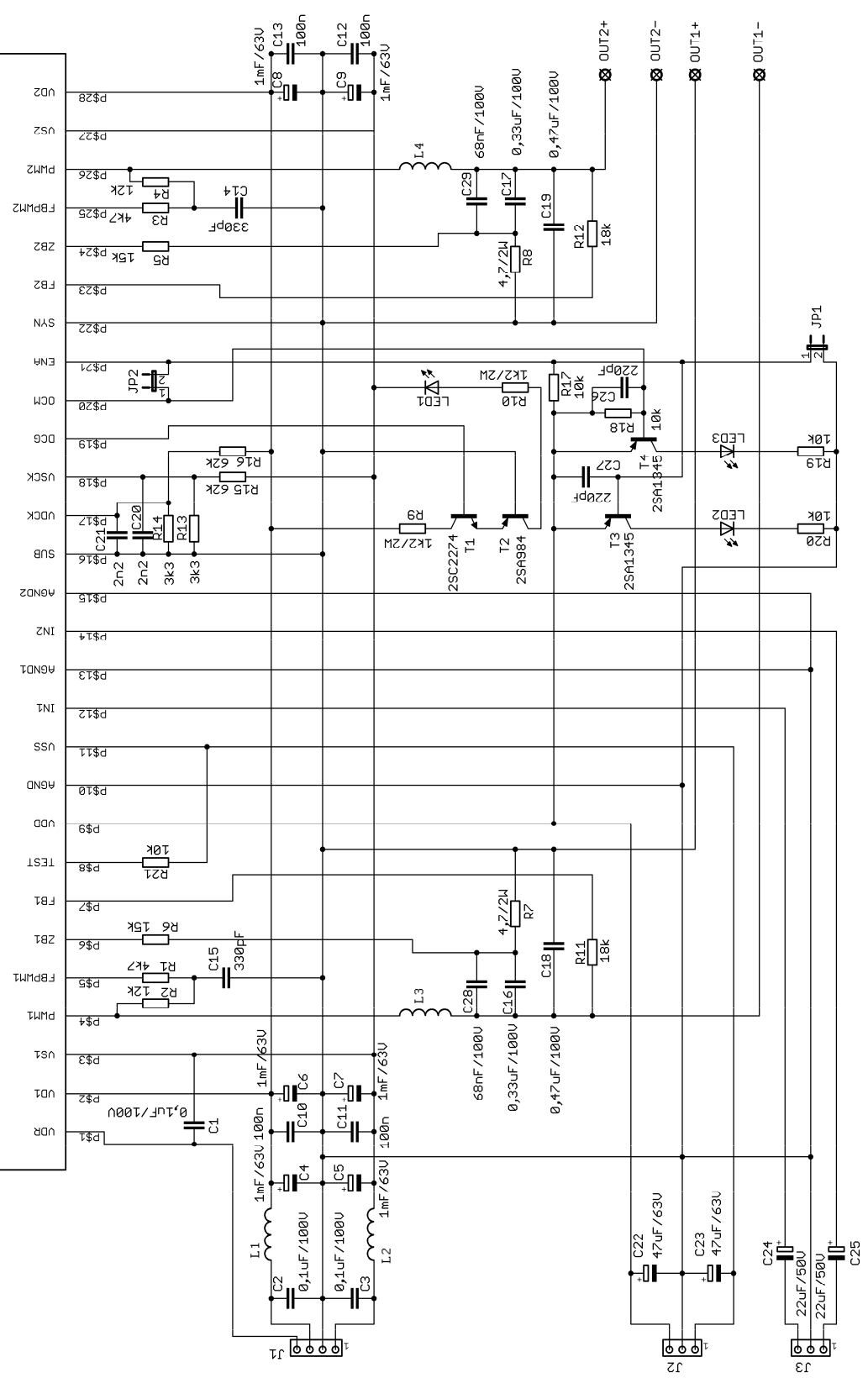
Použitý typ železoprachových jader:

$$T80 - 26, Al = 450 \mu H / 100z \Rightarrow Al = 45 nH / z^2 \quad (1)$$

Výpočet počtu závitů cívky:

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}} = \sqrt{\frac{20000}{45}} = 21z \quad (2)$$

# STK428-610

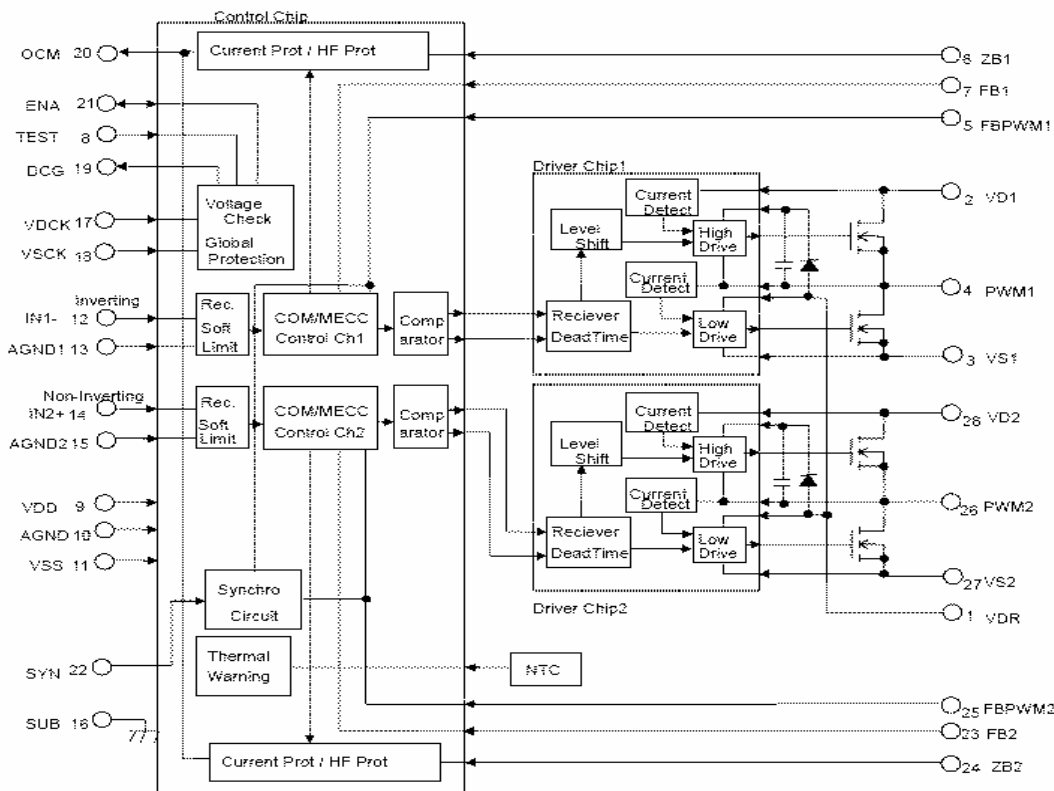


Obr.3.10: Schéma zapojení koncového zesilovacího stupně

### 3.2.2. Popis zapojení

Konektorem J1 je k hybridnímu obvodu připojeno symetrické napájecí napětí  $\pm 31V$  pro výkonový stupeň (dále jen power stage). Index označení svorek určuje, o který ze zesilovacích kanálů se jedná. Pro každý kanál je napájení power stage opatřeno filtračními kondenzátory, umístěnými co nejbližší pouzdru, a to proto, aby byly odfiltrovány parazitní složky vznikající na plošném spoji. Na vstupu napájení je zařazen navíc LC filtr odstraňující parazitní vlastnosti napájecí kabeláže. Dále je zde přivedeno i napájecí napětí pro řídicí obvody power stage, vztaženo k zápornému napájení ( $-31V+10V$ ) [4]. Konektorem J2 je k obvodu připojeno symetrické napájecí napětí  $\pm 5V$  pro řídicí a ochranné obvody. Dle doporučení výrobce by napájení řídicích obvodů mělo být nezávislé na napájení power stage. Konektor J3 slouží k přivedení zesilovaného nf signálu a měl by být umístěn co nejbližší k pouzdru IO. Vývody PWM hybridního obvodu jsou výstupními výkonovými piny, jež jsou přes LC filtry tvořeny součástkami L3, C18 a L4, C19 přivedeny na výstupní svorky pro připojení reproduktorů. Vzhledem k potlačení konfliktů spínání obvodu a vyvážení odběru symetrického napájení je vstupní signál kanálu 1 invertován, proto je polarita výstupních svorek tohoto kanálu zaměněna. Vývody FB slouží ke zpětné vazbě zesílení obvodu a jsou přes rezistory R11 a R12 připojeny k výstupu LC filtrů. Piny ZB slouží k hlídání velikosti proudu do reproduktorů a limitace zesilovače. Piny FBPWM umožňují synchronizaci pulzně šířkové modulace obvodu. Vývody VDCK a VSCK kontrolují úroveň napájecích napětí pro power stage, a pokud dojde k podpětí, přepětí či nepřítomnosti jedné větve napájecího napětí, začne pracovat ochrana, jež přeruší spínání obvodu a obvod je tak uveden do stavu STANDBY. Tento stav je indikován svítivou diodou LED1. Další funkcí těchto vývodů je také zpětná vazba na zesílení vlivem kolísání napájecího napětí pro power stage. Kolísání napájecího napětí je kompenzováno změnou zesílení obvodu, a proto nemá žádný vliv na úroveň výstupního signálu [5]. Pin ENA slouží ke spuštění spínání obvodu. Při připojení tohoto pinu na nízkou úroveň, tedy jeho uzemněním, obvod přestane spínat a je uveden do režimu STANDBY. Režim STANDBY je indikován svítivou diodou D2. Vývod OCM indikuje chybový stav obvodu. Na jeho výstupu se objeví nízká úroveň při jakémkoli ze tří kritických stavů hybridního obvodu a obvod je automaticky uveden do stavu STANDBY. Tyto tři kritické stavy jsou zkrat na výstupu, překročení limitace zesilovače a přehřátí obvodu. Posledním funkčním vývodem je pin SYN sloužící k synchronizaci spínacího kmitočtu s AM signálem, vzhledem k povaze zapojení je však tato funkce blokována uzemněním tohoto pinu. Vzhledem k tomu, že účinnost zesilovače a harmonické zkreslení výstupního signálu jsou velmi úzce spjaté s kvalitou provedení výstupního filtru, bude jako výstupní indukčnost použita cívka navinuta na železoprachovém toroidním jádru AMIDON. Feritové jádra totiž nejsou stavěná na přenos velkých výkonů, dochází k jejich značnému zahřívání a tím i znehodnocení.

### 3.2.3. Vnitřní zapojení hybridního obvodu STK428-610



Obr.3.11: Vnitřní zapojení obvodu STK428-610

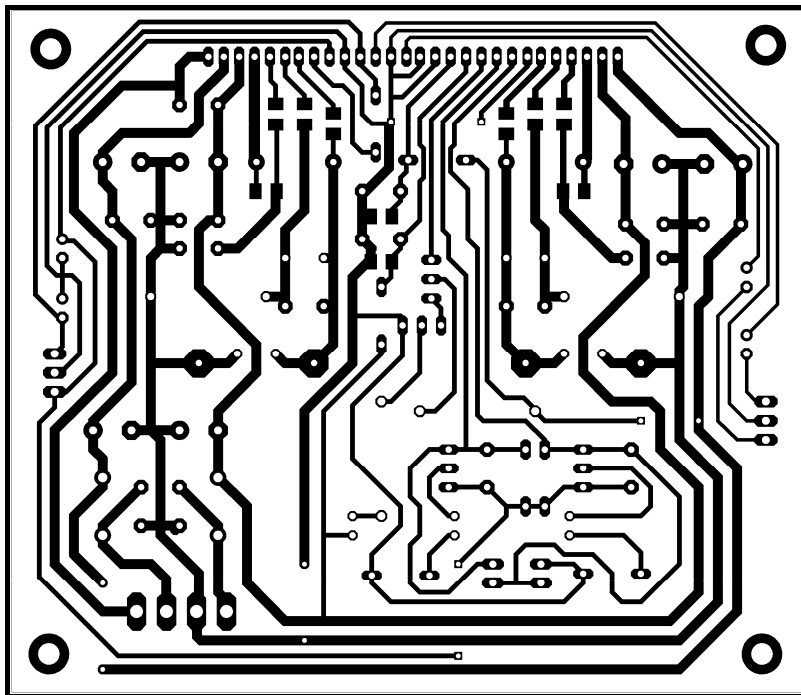
### 3.2.4. Specifické parametry obvodu

| Parametr                              | symbol   | hodnota    | veličina             | poznámka                     |
|---------------------------------------|----------|------------|----------------------|------------------------------|
| Max. napájecí napětí                  | VD/VS    | $\pm 50$   | V                    | špičková hodnota             |
| Max. řídicí napájecí napětí           | VDR      | VS+15      | V                    |                              |
| Max. napájecí napětí řídicích obvodů  | VDD/VDS  | $\pm 7,5$  | V                    |                              |
| Max. ef. Hodnota nf vstupního signálu | IN1,IN2  | 6          | V                    |                              |
| Tepelný odpor                         | $\Theta$ | 12         | $^{\circ}\text{C/W}$ | na jeden výstupní tranzistor |
| Max. teplota čipu                     | Tj max   | 150        | $^{\circ}\text{C}$   |                              |
| Max. teplota pouzdra                  | Tc max   | 105        | $^{\circ}\text{C}$   |                              |
| Pracovní teplota                      | Tstg     | -30 až 125 | $^{\circ}\text{C}$   |                              |
| Typ. Napájecí napětí                  | VD/VS    | $\pm 41$   | V                    | impedance zátěže 8 $\Omega$  |
| Typ. Napájecí napětí                  | VD/VS    | $\pm 31$   | V                    | impedance zátěže 4 $\Omega$  |
| Typ. Řídicí nap. Napětí               | VDR      | VS+10      | V                    |                              |
| Typ. Napájecí napětí řídicích obvodů  | VDD/VDS  | $\pm 5$    | V                    |                              |
| Účinnost power stage                  | $\eta$   | 87%        |                      | při výst výkonu 2x70W        |
| Vstupní impedance                     | Zin      | 4,7k       | $\Omega$             | 1kHz                         |

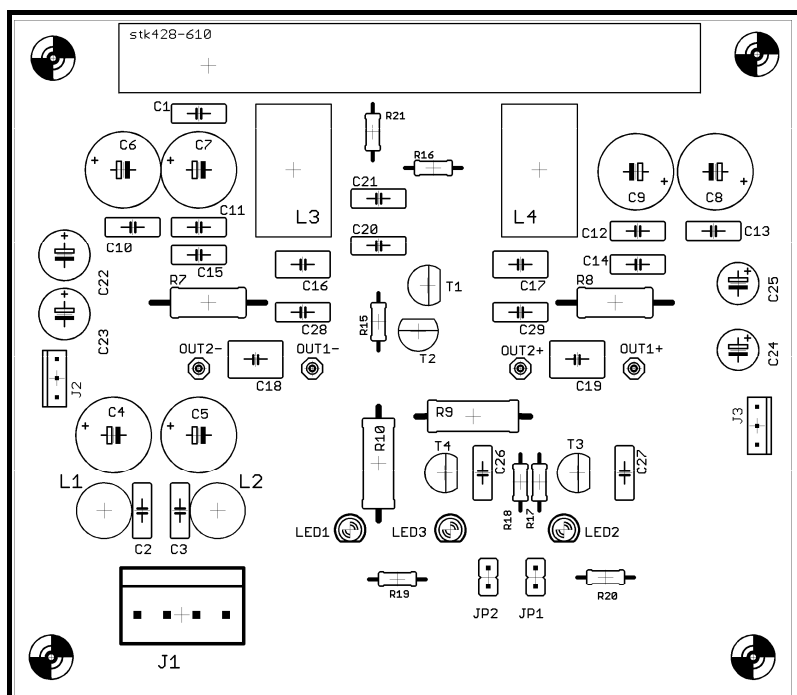
Tab.3.12: Tabulka parametrů koncového zesilovacího stupně

### 3.2.5. Návrh desky plošného spoje

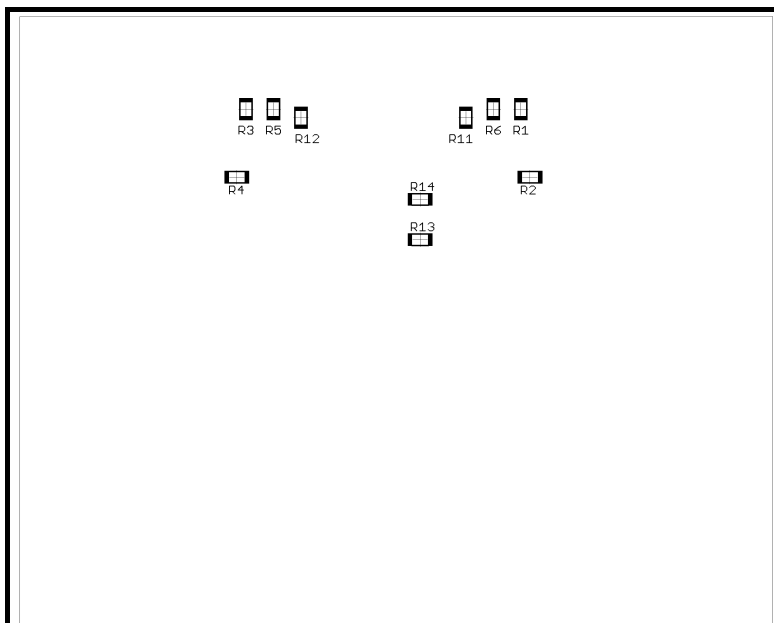
Celý obvod je navržen na jednostranné desce plošného spoje o rozměru 104x90mm. Je dbáno na zásady návrhu spínačových obvodů a ovlivňování se jednotlivých obvodů vlivem jejich polohy. Filtrační kondenzátory napájecího napětí pro power stage jsou umístěny co nejbližší IO. Taktéž výstupní filtr je navržen na nejmenší možné ploše a umístěn co nejbližší IO a nf signál je veden k IO nejkratší možnou cestou, při použití co možná nejtenčího spoje.



Obr.3.13:Obrázek DPS 1:1



Obr.3.13:Rozmístění součástek na DPS, strana TOP



Obr.3.14: Rozmístění součástek na DPS, strana BOTTOM

### 3.2.6. Seznam součástek

| Název       | Hodnota     | Poznámka      | cena      |
|-------------|-------------|---------------|-----------|
| C1,C2,C3    | 0,1uF/100V  | foliový       | 9,90 Kč   |
| C4-C9       | 680uF/63V   | elyt          | 64,90 Kč  |
| C10-C13     | 100n        | keramický     | 4,80 Kč   |
| C14,C15     | 330pF       | keramický     | 3,00 Kč   |
| C16,C17     | 0,33uF/100V | foliový       | 8,20 Kč   |
| C18,C19     | 0,47uF/100V | foliový       | 11,00 Kč  |
| C20,C21     | 2n2         | keramický     | 3,00 Kč   |
| C22,C23     | 47uF/63V    | elyt          | 3,80 Kč   |
| C24,C25     | 22uF/50V    | elyt          | 2,80 Kč   |
| C26,C27     | 220pF       | keramický     | 3,00 Kč   |
| C28,C29     | 68nF/100V   | foliový       | 4,40 Kč   |
| J1          | PWL04       | konektor      | 1,20 Kč   |
| J2,J3       | PSS254/03   | konektor      | 2,60 Kč   |
| LED1-LED3   | led3mm      | led           | 7,20 Kč   |
| R1,R3       | 4k7         | M1206         | 4,00 Kč   |
| R2,R4       | 12k         | M1206         | 4,00 Kč   |
| R5,R6       | 15k         | M1206         | 4,00 Kč   |
| R7,R8       | 4,7/2W      | 411           | 6,20 Kč   |
| R9,R10      | 1k2/2W      | 411           | 6,20 Kč   |
| R11,R12     | 18k         | 204           | 1,40 Kč   |
| R13,R14     | 3k3         | 204           | 1,40 Kč   |
| R15,R16     | 62k         | 204           | 1,40 Kč   |
| R17-R21     | 10k         | 204           | 1,40 Kč   |
| T1          | 2SC2274     | sanyo         | 7,30 Kč   |
| T2          | 2SA984      | sanyo         | 5,20 Kč   |
| T3,T4       | 2SA1345     | sanyo         | 16,80 Kč  |
| IO          | STK428-610  | sanyo         | 599,00 Kč |
| L1,L2       | 2,1uH       | ferit         | 46,00 Kč  |
| L3,L4       | 20uH        | toroid AMIDON | 87,00 Kč  |
| cena celkem |             |               | 921,10 Kč |

Tab.3.15: Seznam součástek nf koncového zesilovacího stupně

### 3.3. Návrh spínaného napájecího zdroje

#### 3.3.1. Určení parametrů zdroje

Nejprve je nutné určit všechna napájecí napětí, která by měl napájecí zdroj poskytnout a také určit proudová zatížení pro jednotlivé napájecí větve.

Určení parametrů napájení pro power stage koncového výkonového nf zdroje:

Napájecí napětí:  $U_{1,2} = \pm 31V$

Vycházíme ze známého výkonu power stage a jeho účinnosti.

Výkon power stage:  $P = 2 \cdot 70W = 140W$

Účinnost power stage:  $\eta = 0,87$

Výkonové zatížení zdroje:  $P \cdot \frac{1}{\eta} = 140 \cdot \frac{1}{0,87} = 161W$  (3)

Z důvodu možné nižší účinnosti power stage, vlivem nedokonalosti návrhu, je nutné vytvořit na zdroji výkonovou rezervu, která je zvolena na 10W:

$P = 161W + 10W = 171W$  (4)

Určení proudů napájecích větví:  $I_{1,2} = \frac{P}{2 \cdot U_{1,2}} = \frac{171}{2 \cdot 31V} = 2,75A$  (5)

Určení parametrů napájecích větví pro řídicí obvody nf koncového zesilovacího stupně:

Pro napájení řídicích obvodů koncového zesilovacího napětí jsou potřeba tři napájecí větve:

$U_{3,4} = \pm 5V, U_5 = 10V$

Výkony napájecích větví řídicích obvodů byly určeny jednotně:

$P_{3,4} = 5W, P_5 = 5W$

Určení proudů pro napájecí větve:

$I_{3,4} = \frac{P}{2 \cdot U_{3,4}} = \frac{5}{2 \cdot 5} = 0,5A$   
 $I_5 = \frac{P}{U_5} = \frac{5}{10} = 0,5A$  (6)

### Určení parametrů napájecí větve pro korekční nf předzesilovač a případné periferní zařízení:

Pro napájení korekčního nf předzesilovače je potřeba jedna napájecí větev:

$$U_6 = 12V$$

Výkon napájecí větve je určen tak, aby byl schopen pojmout jmenovitý příkon předzesilovače, i případných dalších periferních zařízení:

$$P_6 = 2W$$

Určení proudu pro napájecí větev:

$$I_6 = \frac{P}{U_6} = \frac{21}{12} = 1,75A \quad (7)$$

Pro určení celkového výkonu sečteme výkony všech napájecích větví:

$$P_{celkový} = P_{1,2} + P_{3,4} + P_5 + P_6 = 171 + 5 + 5 + 21 = 202W \quad (8)$$

Pro dosažení maximální účinnosti zdroje je nutné použít jednotné napájecí napětí 230V, které je dáno předdefinovanou maximální a minimální hodnotou tohoto napětí

$$\begin{aligned} U_{1no\ min\ a\ ln\ i} &= 230V \\ U_{1min} &= 195V \\ U_{1max} &= 265V \end{aligned} \quad (9)$$

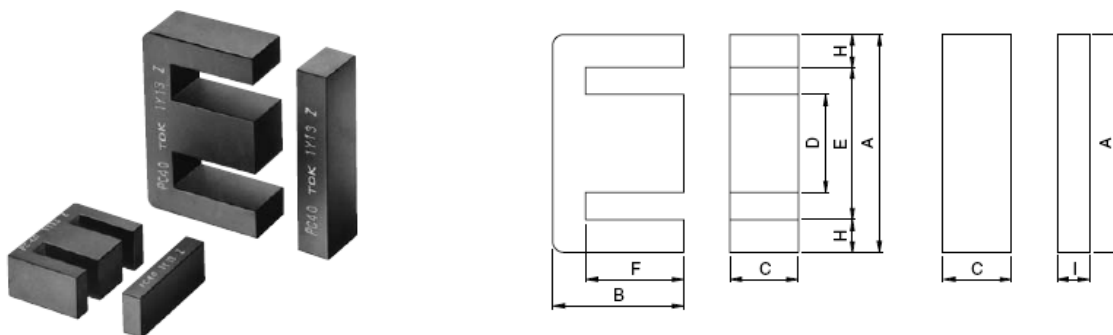
### **3.3.2. Výběr vhodných komponentů zdroje**

#### Řídicí obvod

Ze získaných parametrů zdroje v předešlých bodech můžeme nyní vybrat řídicí obvod spínaného zdroje. Dle požadovaného výstupního výkonu musíme vybírat mezi obvody topswitch řady GX. Mezi obvody této řady byl vybrán obvod TopSwitch GX249Y s maximálním dosažitelným výkonem 250W při použití ve větraném Šasi a jednotného vstupního napájecího napětí 230V.

#### Impulzní transformátor

Při výběru vhodného impulzního transformátoru je nutné dbát na to, aby byl transformátor schopen přenést odpovídající požadovaný výkon a také aby byl na kostičce transformátoru dostatečný prostor pro navinutí všech vinutí. Pro nominální výkon 202W bylo vybráno feritové jádro výrobce TDK typu IE40, jenž má také dostatečný prostor pro navinutí všech vinutí.



Obr.3.16: Tvar feritového jádra impulsního transformátoru a jeho rozměry

| EI40     |                     |                    |       |                    |                      |                |      |          |
|----------|---------------------|--------------------|-------|--------------------|----------------------|----------------|------|----------|
| rozměr   | A                   | B                  | C     | D                  | E                    | F              | H    | I        |
| jednotka | [mm]                | [mm]               | [mm]  | [mm]               | [mm]                 | [mm]           | [mm] | [mm]     |
| hodnota  | 40                  | 27,25              | 11,65 | 11,65              | 27,2                 | 20,25          | 6,2  | 7,3      |
| parametr | C1                  | Ae                 | Le    | Ve                 | Al                   | ztráty v jádru |      | hmotnost |
| jednotka | [mm <sup>-1</sup> ] | [mm <sup>2</sup> ] | [mm]  | [mm <sup>3</sup> ] | [nH/N <sup>2</sup> ] | [W]            |      | [g]      |
| hodnota  | 0.52                | 148                | 77    | 11400              | 4860                 | 4,8            |      | 60       |

Tab.3.17: Tabulka parametrů feritového jádra transformátoru.

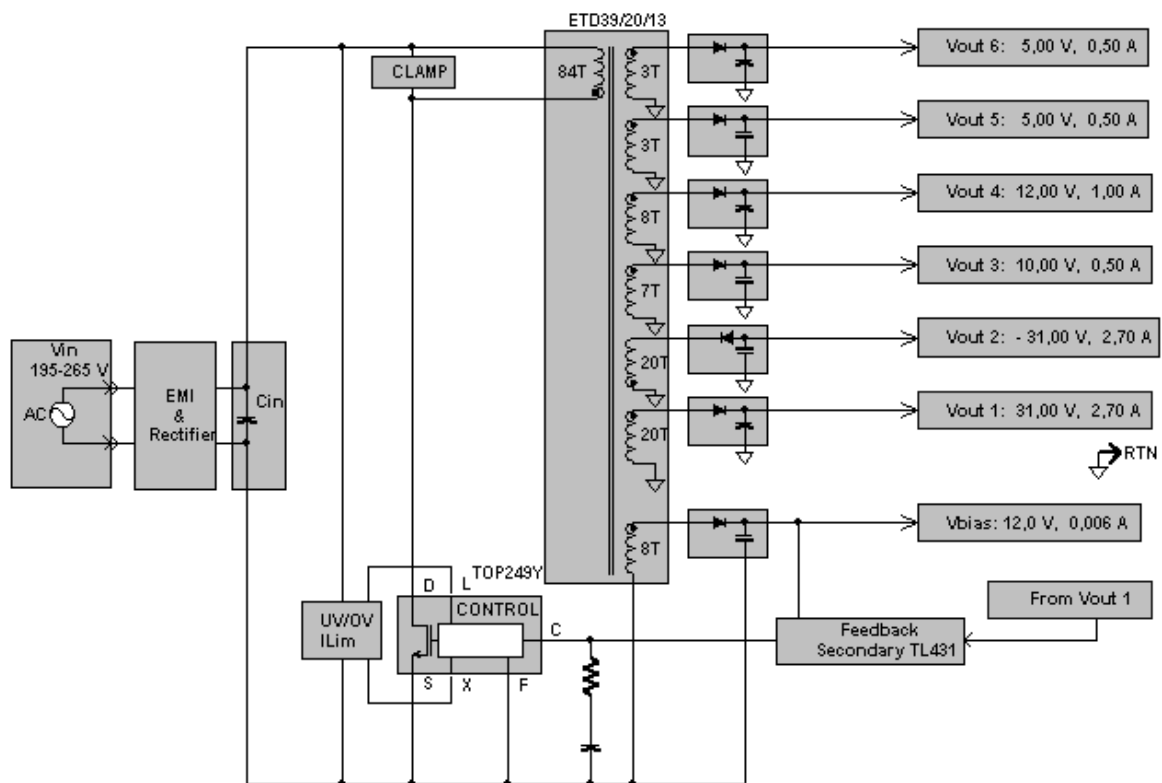
Po výběru vhodného jádra transformátoru přichází na řadu výběr vhodné kostičky pro jádro. Jako nejvhodnější kostička se jeví typ **BE40-1112CPNFR** od téhož výrobce. Tato kostička má dvanáct vývodů pro osazení do plošného spoje a je zobrazena na následujícím obrázku.



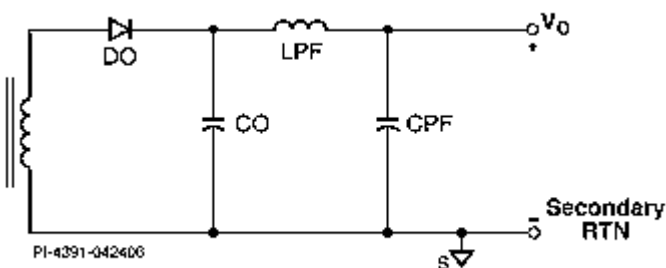
Obr.3.18: Tvar kostičky pro jádro impulsního transformátoru

### 3.3.3. Počítačový návrh spínaného zdroje

Na základě skutečností z předchozích bodů návrhu nyní můžeme provést počítačový návrh zdroje, ke kterému jsou určeny návrhové programy od výrobce řídicího obvodu Power integration. Na internetových stránkách společnosti Power Integration jsou tyto návrhové programy volně k dispozici. Pro prvotní počítačový návrh použijeme program PLExpert. Tomuto programu zadáme parametry zdroje z předchozích bodů návrhu a program vytvoří kompletní ideový návrh zdroje, včetně výběru vhodného transformátoru, použití typu zpětné vazby a také provede výběr součástek pro výstupní usměrňovací obvody. Pro náš návrh budeme potřebovat pouze výběr parametrů součástek pro výstupní usměrňovací a filtrační obvody, jenž jsou obsaženy v následující tabulce (Tab.3.21). Program také vytvoří předběžné blokové schéma zdroje.



Obr.3.19: Předběžné blokové schéma spínaného zdroje



Obr.3.20: Schéma výstupního usměrňovacího a filtračního obvodu zdroje

| vinutí |       | doporučené hodnoty |                |                 |                 | zvolené hodnoty |                |                 |                 |
|--------|-------|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| napětí | proud | D <sub>0</sub>     | C <sub>0</sub> | C <sub>pf</sub> | L <sub>pf</sub> | D <sub>0</sub>  | C <sub>0</sub> | C <sub>pf</sub> | L <sub>pf</sub> |
| [V]    | [A]   | [-]                | [uF]           | [uF]            | [uH]            | [-]             | [uF]           | [uF]            | [uH]            |
| 31     | 2,75  | MURD620CT          | 2x270          | 100-680         | 2,2-10          | BYV32/600       | 1x680          | 680             | 5,6             |
| -31    | 2,75  | MURD620CT          | 2x270          | 100-680         | 2,2-10          | BYV32/600       | 1x680          | 680             | 5,6             |
| 5      | 0,5   | SB530              | 1x470          | 100-680         | 2,2-10          | UF4001          | 1x680          | 680             | 5,6             |
| -5     | 0,5   | SB530              | 1x470          | 100-680         | 2,2-10          | UF4001          | 1x680          | 680             | 5,6             |
| 10     | 0,5   | UF4001             | 1x330          | 100-680         | 2,2-10          | UF4001          | 1x560          | 560             | 5,6             |
| 15     | 1,75  | SF51               | 1x470          | 100-680         | 2,2-10          | UF4001          | 1x680          | 680             | 5,6             |

Tab.3.21: Tabulka parametrů výstupních usměrňovacích a filtračních obvodů

Pro druhou část počítačového návrhu je použit program PIXIs Designer, jedná se o tabulkový procesor, kterému zadáme totožné hodnoty jako v předchozím bodě. Tento program však slouží k optimalizaci návrhu transformátoru zdroje a vstupních obvodů zdroje.

Program tedy vyžaduje zadání také parametrů impulsního transformátoru. Program sám hlásí chybné oblasti návrhu i s doporučeným řešením (změna některého ze vstupních parametrů). Výsledkem této optimalizace je dále uvedená tabulka, ze které je vytvořeno konstrukční schéma a konstrukční tabulka samotného transformátoru.

| ACDC_TOPSwitchGX_043007;<br>Rev.2.15; Copyright Power<br>Integrations 2007 | INPUT         | INFO        | OUTPUT       | UNIT      | TOP_GX_FX_043007:<br>TOPSwitch-GX/FX<br>Continuous/Discontinuous<br>Flyback Transformer<br>Design Spreadsheet |
|--|---------------|-------------|--------------|-----------|---|
| <b>ENTER APPLICATION<br/>VARIABLES</b>                                     |               |             |              |           | <b>Customer</b>   |
| VACMIN   | 195           |             |              | Volts     | Minimum AC Input Voltage  |
| VACMAX   | 265           |             |              | Volts     | Maximum AC Input Voltage  |
| fL   | 50            |             |              | Hertz     | AC Mains Frequency  |
| VO   | 31,00         |             |              | Volts     | Output Voltage (main)   |
| PO   | 200,00        |             |              | Watts     | Output Power  |
| N  | 0,73          |             |              |           | Efficiency Estimate   |
| Z  | 0,50          |             |              |           | Loss Allocation Factor  |
| VB   | 15            |             |              | Volts     | Bias Voltage  |
| tC   | 3,00          |             |              | mSeconds  | Bridge Rectifier Conduction<br>Time Estimate  |
| CIN  | 220,00        |             |              | uFarads   | Input Filter Capacitor  |
|  |               |             |              |           |   |
| <b>ENTER TOPSWITCH-GX<br/>VARIABLES</b>                                    |               |             |              |           |   |
| <b>TOP-GX</b>  | <b>TOP249</b> |             |              | Universal | 115 Doubled/230V  |
| Chosen Device  |               | TOP249      | Power<br>Out | 180W      | 250W  |
| KI   | 1,00          |             |              |           | External Ilimit reduction<br>factor (KI=1.0 for default<br>ILIMIT, KI <1.0 for lower<br>ILIMIT)               |
| ILIMITMIN  |               |             | 5,022        | Amps      | Use 1% resistor in setting<br>external ILIMIT   |
| ILIMITMAX  |               |             | 5,778        | Amps      | Use 1% resistor in setting<br>external ILIMIT   |
| Frequency (F)=132kHz,<br>(H)=66kHz   | <b>F</b>      |             |              |           | Full (F) frequency option -<br>132kHz   |
| fS   |               |             | 132000       | Hertz     | TOPSwitch-GX Switching<br>Frequency: Choose<br>between 132 kHz and 66<br>kHz                                  |
| fSmin  |               |             | 124000       | Hertz     | TOPSwitch-GX Minimum<br>Switching Frequency   |
| fSmax  |               |             | 140000       | Hertz     | TOPSwitch-GX Maximum<br>Switching Frequency   |
| VOR  | 120,00        |             |              | Volts     | Reflected Output Voltage  |
| VDS  | 10,00         |             |              | Volts     | TOPSwitch on-state Drain to<br>Source Voltage   |
| VD   | 0,50          |             |              | Volts     | Output Winding Diode<br>Forward Voltage Drop  |
| VDB  | 0,70          |             |              | Volts     | Bias Winding Diode Forward<br>Voltage Drop  |
| KP   | 0,58          |             |              |           | Ripple to Peak Current Ratio<br>(0.4 < KRP < 1.0 : 1.0 <<br>KDP < 6.0)  |
|  |               |             |              |           |   |
| <b>ENTER TRANSFORMER<br/>CORE/CONSTRUCTION<br/>VARIABLES</b>               |               |             |              |           |   |
| <b>Core Type</b>   | <b>EI40</b>   |             |              |           |   |
| Core   |               | EI40        |              | P/N:      | PC40EI40-Z  |
| Bobbin   |               | EI40_BOBBIN |              | P/N:      | BE-40-1112CPN   |
| AE   |               |             | 1,48         | cm^2      | Core Effective Cross<br>Sectional Area  |
| LE   |               |             | 7,7          | cm        | Core Effective Path Length  |
| AL   |               |             | 4860         | nH/T^2    | Ungapped Core Effective<br>Inductance   |
| BW   |               |             | 17,3         | mm        | Bobbin Physical Winding<br>Width  |

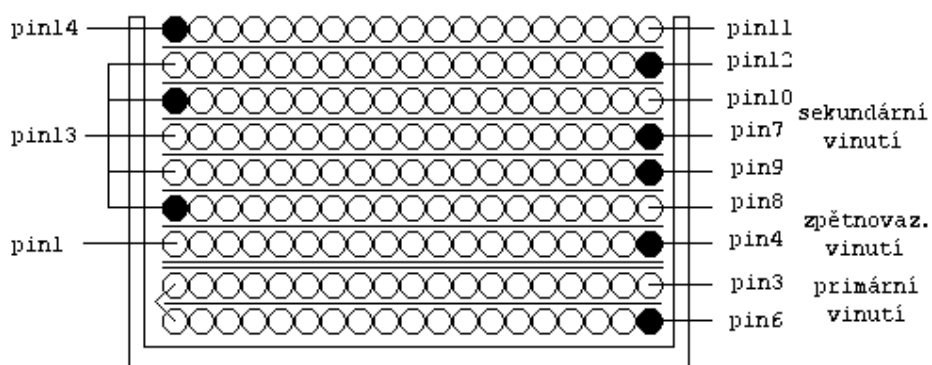
|   |       |  |       |           |   |
|---|-------|--|-------|-----------|---|
| M   | 3,00  |  |       | mm        | Safety Margin Width (Half the Primary to Secondary Creepage Distance) |
| L   | 2,00  |  |       |           | Number of Primary Layers  |
| NS  | 9     |  |       |           | Number of Secondary Turns   |
| <b>DC INPUT VOLTAGE PARAMETERS</b>  |       |  |       |           |   |
| VMIN  | 227,5 |  | 228   | Volts     | Minimum DC Input Voltage  |
| VMAX  |       |  | 375   | Volts     | Maximum DC Input Voltage  |
| <b>CURRENT WAVEFORM SHAPE PARAMETERS</b>                                  |       |  |       |           |   |
| DMAX  |       |  | 0,36  |           | Maximum Duty Cycle  |
| IAVG  |       |  | 1,20  | Amps      | Average Primary Current   |
| IP  |       |  | 4,77  | Amps      | Peak Primary Current  |
| IR  |       |  | 2,77  | Amps      | Primary Ripple Current  |
| IRMS  |       |  | 2,08  | Amps      | Primary RMS Current   |
| <b>TRANSFORMER PRIMARY DESIGN PARAMETERS</b>                              |       |  |       |           |   |
| LP  |       |  | 204   | uHenries  | Primary Inductance  |
| NP  |       |  | 34    |           | Primary Winding Number of Turns                                       |
| NB  |       |  | 4     |           | Bias Winding Number of Turns  |
| ALG   |       |  | 173   | nH/T^2    | Gapped Core Effective Inductance                                      |
| BM  |       |  | 1917  | Gauss     | Maximum Flux Density at PO, VMIN (BM<3000)                            |
| BP  |       |  | 2322  | Gauss     | Peak Flux Density (BP<4200)   |
| BAC   |       |  | 556   | Gauss     | AC Flux Density for Core Loss Curves (0.5 X Peak to Peak)             |
| Ur  |       |  | 2012  |           | Relative Permeability of Ungapped Core                                |
| LG  |       |  | 1,03  | mm        | Gap Length (Lg > 0.1 mm)  |
| BWE   |       |  | 22,6  | mm        | Effective Bobbin Width  |
| OD  |       |  | 0,66  | mm        | Maximum Primary Wire Diameter including insulation                    |
| INS   |       |  | 0,07  | mm        | Estimated Total Insulation Thickness (= 2 * film thickness)           |
| DIA   |       |  | 0,59  | mm        | Bare conductor diameter   |
| AWG   |       |  | 23    | AWG       | Primary Wire Gauge (Rounded to next smaller standard AWG value)       |
| CM  |       |  | 512   | Cmils     | Bare conductor effective area in circular mils                        |
| CMA   |       |  | 247   | Cmils/Amp | Primary Winding Current Capacity (200 < CMA < 500)                    |
| <b>TRANSFORMER SECONDARY DESIGN PARAMETERS (SINGLE OUTPUT EQUIVALENT)</b> |       |  |       |           |   |
| <b>Lumped parameters</b>  |       |  |       |           |   |
| ISP   |       |  | 18,17 | Amps      | Peak Secondary Current  |
| ISRMS   |       |  | 10,64 | Amps      | Secondary RMS Current   |
| IO  |       |  | 6,45  | Amps      | Power Supply Output Current   |
| IRIPPLE   |       |  | 8,46  | Amps      | Output Capacitor RMS Ripple Current                                   |
| CMS   |       |  | 2128  | Cmils     | Secondary Bare Conductor minimum circular mils                        |
| AWGS  |       |  | 16    | AWG       | Secondary Wire Gauge (Rounded up to next larger standard AWG value)   |

|   |       |  |       |       |  |
|---|-------|--|-------|-------|--|
| DIAS  |       |  | 1,29  | mm    | Secondary Minimum Bare Conductor Diameter                              |
| ODS   |       |  | 1,26  | mm    | Secondary Maximum Outside Diameter for Triple Insulated Wire           |
| INSS  |       |  | -0,02 | mm    | Maximum Secondary Insulation Wall Thickness                            |
| <b>VOLTAGE STRESS PARAMETERS</b>                                  |       |  |       |       |  |
| VDRAIN  |       |  | 647   | Volts | Maximum Drain Voltage Estimate (Includes Effect of Leakage Inductance) |
| PIVS  |       |  | 129   | Volts | Output Rectifier Maximum Peak Inverse Voltage                          |
| PIVB  |       |  | 64    | Volts | Bias Rectifier Maximum Peak Inverse Voltage                            |
|   |       |  |       |       |  |
|   |       |  |       |       |  |
|   |       |  |       |       |  |
| <b>TRANSFORMER SECONDARY DESIGN PARAMETERS (MULTIPLE OUTPUTS)</b> |       |  |       |       |  |
| <b>1st output</b>   |       |  |       |       |  |
| VO1   | 31,00 |  | 31    | Volts | Output Voltage   |
| IO1   | 2,70  |  | 2,7   | Amps  | Output DC Current  |
| PO1   |       |  | 83,70 | Watts | Output Power   |
| VD1   |       |  | 0,5   | Volts | Output Diode Forward Voltage Drop                                      |
| NS1   |       |  | 9,00  |       | Output Winding Number of Turns   |
| ISRMS1  |       |  | 4,454 | Amps  | Output Winding RMS Current   |
| IRIPPLE1  |       |  | 3,54  | Amps  | Output Capacitor RMS Ripple Current                                    |
| PIVS1   |       |  | 129   | Volts | Output Rectifier Maximum Peak Inverse Voltage                          |
|   |       |  |       |       |  |
| CMS1  |       |  | 891   | Cmils | Output Winding Bare Conductor minimum circular mils                    |
| AWGS1   |       |  | 20    | AWG   | Wire Gauge (Rounded up to next larger standard AWG value)              |
| DIAS1   |       |  | 0,81  | mm    | Minimum Bare Conductor Diameter  |
| ODS1  |       |  | 1,26  | mm    | Maximum Outside Diameter for Triple Insulated Wire                     |
|   |       |  |       |       |  |

Tab.3.22: Výstupní tabulka návrhového programu PIXIs design expert

### 3.3.4. Konstrukční návrh transformátoru a cívek výstupních LC filtrů

#### Transformátor



Obr.3.23: Konstrukční schéma impulsního transformátoru

Černě označené ve schématu jsou počátky vinutí, tak jako jsou označeny v blokovém schématu. Pro správnou funkci transformátoru je nutné, aby bylo primární vinutí navinuto v opačném smyslu než všechna ostatní vinutí!

| vinutí        | napětí | proud | výkon | piny pouzdra | průměr vodiče |       | počet závitů |
|---------------|--------|-------|-------|--------------|---------------|-------|--------------|
| -             | [V]    | [A]   | [W]   | [-]          | [AWG]         | [mm]  | [-]          |
| primární      | 230    | 2,01  | -     | 3,6          | 24            | 2x0,4 | 34           |
| zpětnovazební | 10     | 0,01  | 0,1   | 4,1          | 29            | 5x0,1 | 4            |
| sekundární    | 31     | 2,75  | 85,25 | 12,13        | 20            | 4x0,4 | 9            |
| sekundární    | -31    | 2,75  | 85,25 | 10,13        | 20            | 4x0,4 | 9            |
| sekundární    | 5      | 0,5   | 2,5   | 9,13         | 26            | 1x0,4 | 3            |
| sekundární    | -5     | 0,5   | 2,5   | 8,13         | 26            | 1x0,4 | 3            |
| sekundární    | 10     | 0,5   | 5     | 11,14        | 26            | 1x0,4 | 4            |
| sekundární    | 15     | 1,75  | 26,25 | 7,13         | 24            | 2x0,4 | 4            |

Tab.3.24:Konstrukční tabulka transformátoru

#### Cívky LC filtrů

Pro vysoký výstupní výkon byly pro cívky LC filtrů použity železoprachová toroidní jádra amidon. Pro snížení rozměru DPS jsou použity dvě trifilárně vinuté cívky. Následuje postup výpočtu průřezu Cu drátu a počtu závitů pro každé vinutí cívky.

Použity 2.typy železoprachových jader:

$$T106 - 26, Al = 900\mu H / 100z \Rightarrow Al = 90nH / z^2 \quad (10)$$

$$T157 - 26, Al = 970\mu H / 100z \Rightarrow Al = 97nH / z^2$$

Vzorec pro výpočet počtu závitů cívky:

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}} \quad (11)$$

| napětí | proud | L          | Al                   | N   | S (vodiče)         | d (vodiče) |
|--------|-------|------------|----------------------|-----|--------------------|------------|
| [V]    | [A]   | [ $\mu$ H] | [nH/z <sup>2</sup> ] | [-] | [mm <sup>2</sup> ] | [mm]       |
| 31     | 2,75  | 5,6        | 97                   | 8   | 1,7671             | 1,5        |
| -31    | 2,75  | 5,6        | 97                   | 8   | 1,7671             | 1,5        |
| 10     | 0,5   | 5,6        | 97                   | 8   | 0,2827             | 0,6        |
| 5      | 0,5   | 5,6        | 90                   | 9   | 0,2827             | 0,6        |
| -5     | 0,5   | 5,6        | 90                   | 9   | 0,2827             | 0,6        |
| 15     | 1,75  | 5,6        | 90                   | 9   | 0,7856             | 1          |

Tab.3.25: Konstrukční tabulka cívek výstupních LC filtrů

### 3.3.5. Návrh schématu napájecího zdroje

Z výchozích hodnot všech návrhových bodů máme nyní dostatek informací pro konečný návrh schématu spínaného zdroje. Chybí pouze typ zpětnovazebního obvodu, ten byl pro zjednodušení zapojení použit se zenerovými diodami. Hodnoty všech ostatních součástek ve schématu, které nebyly stanoveny v návrhu, vychází z doporučených hodnot výrobce.

#### Popis činnosti

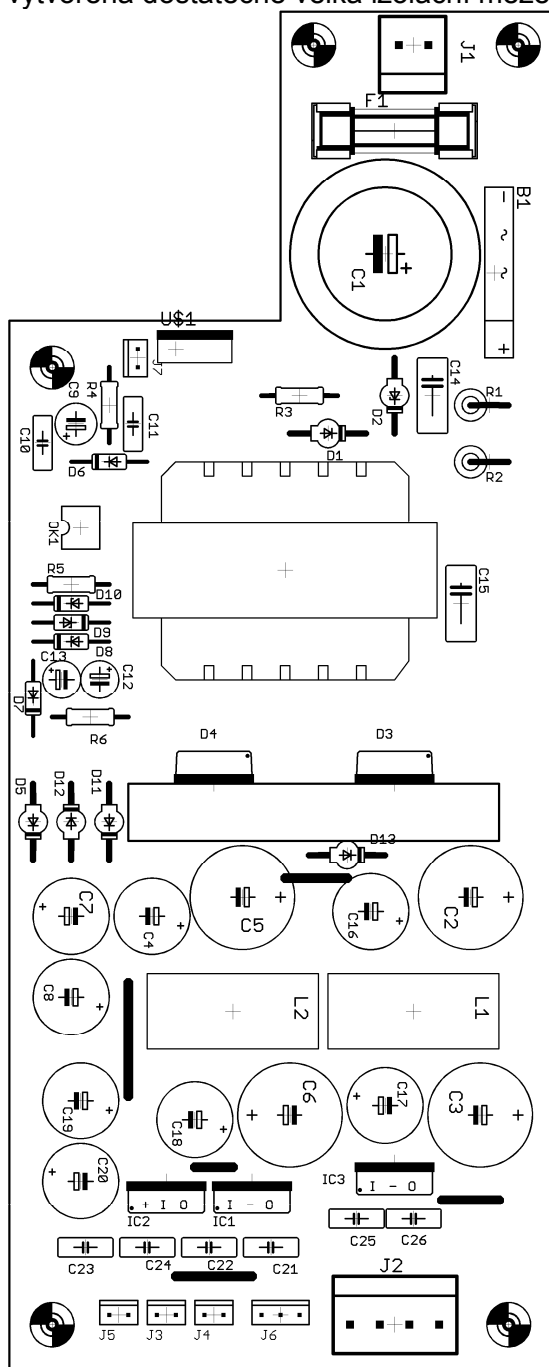
Schéma zapojení na obr.3.26. znázorňuje kompletní zapojení zdroje, jenž je napájeno přímo síťovým napětím odušeným LC filtrem a přivedeným na konektor J1. Střídavé napětí je dále usměrněno můstkem B1 a filtrováno kondenzátorem C1. Potom je kladný pól tohoto napětí přiveden na primární vinutí impulsního transformátoru a z něj na výstupní tranzistor obvodu TOPswitch. Paralelně k primárnímu vinutí transformátoru je připojen demagnetizační obvod tvořený součástkami D1, D2, R1, R2 a C14. Tento obvod pohlcuje energii v době, kdy je výstupní tranzistor řídicího obvodu rozepnut, v té chvíli totiž neteče proud ani primárním, ani sekundárním vinutím a jádro transformátoru se nemá jak demagnetizovat, jeho energie by pak značně narůstala; teoreticky až do nekonečné hodnoty a došlo by ke zničení řídicího obvodu. Rezistorem R3 je snímáno usměrněné síťové napětí a nastaveno vypnutí zdroje při podpětí 100V a přepětí 350V. Mezi piny L a C řídicího obvodu je zapojen konektor pro externí vypínání a zapínání zdroje. Při spojení vývodů konektoru spínačem se zdroj uvede do stavu STANDBY s velmi malým klidovým odběrem. Při rozpojení kontaktů dojde k opětovnému měkkému nastartování zdroje. Měkký start zdroje je další velmi příznivou vlastností zdroje, protože pak nedochází k proudovým nárazům a nemusí být proto použito zpožděné připojení reproduktorů. Vývod C (control) obvodu TOP249Y slouží k řízení zpětné vazby zdroje. Tento vývod je napájen ze zpětnovazebního vinutí transformátoru, jehož napětí je usměrněno diodou D6 a řízeno výstupním tranzistorem optočlenu. Kondenzátory C9, C11 a rezistor R4 tvoří stabilizační obvod zpětnovazebního napětí. Vstupní obvod optronu je připojen na nejvýznamnější výstupní napětí zdroje, jímž je kladné napájecí napětí pro power stage koncového zesilovacího stupně. Toto napětí je zenerovými diodami D8 – D10 omezeno na hodnotu 2V. Při výchylce výstupního napětí tak dojde i k výchylce napětí na vstupu optronu, načež obvod TOPswitch zareaguje změnou střídy spínání a napětí tak stabilizuje na požadovanou hodnotu. Sekundární napětí impulsního transformátoru mají charakter pulzně kódovaného signálu o frekvenci spínání 130kHz. Tato napětí jsou pak usměrněna jednopulzními usměrňovači a spínací kmitočty je odstraněn výstupními LC filtry. Pro napájení výkonového stupně jsou použity shottkyho diody, které je potřeba dostatečně chladit. Pro výstupy s nízkým odběrem jsou použity ultrafast diody. Filtrační kondenzátory musí být použity pro pulzní režim, tedy s nízkou sériovou rezistivitou. Takové kondenzátory mají označení low ESR. Cívky filtrů jsou navinuty na toroidních železoprachových jádrech AMIDON. Symetrické napájecí napětí pro řídicí obvody je stabilizováno obvody IC1 a IC2 na  $\pm 5V$ .



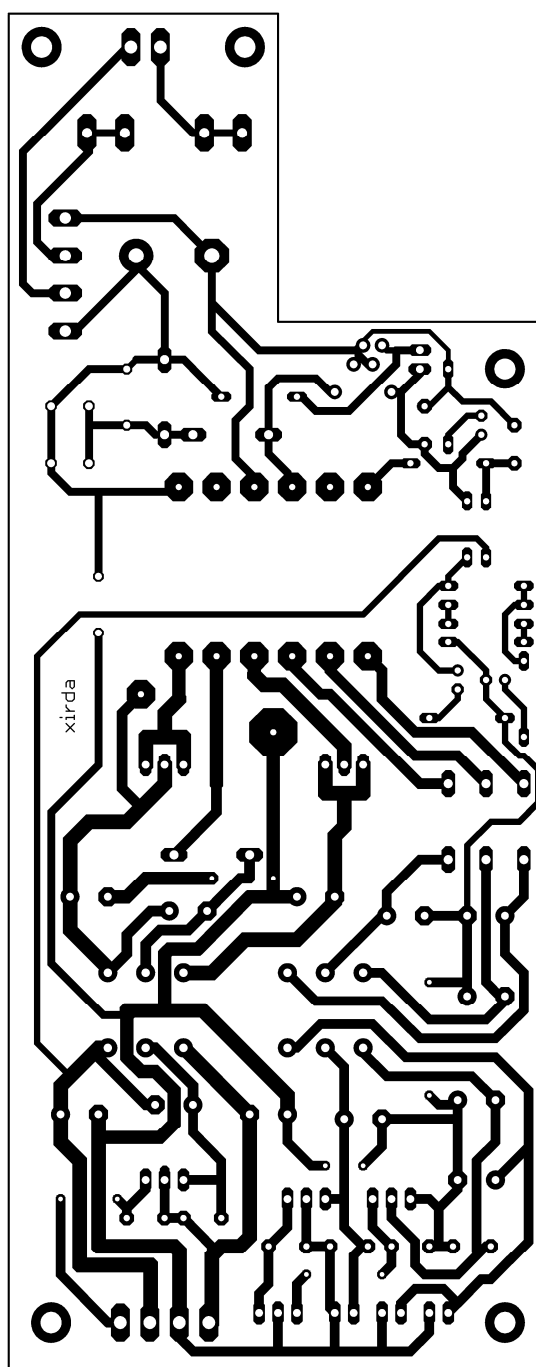
Rovněž řídicí napětí pro power stage koncového stupně je stabilizováno vůči zápornému výkonovému napětí na hodnotu 10V. Na konektory J3, J4 a J5 je přivedeno kladné napětí 12V pro napájení předzesilovače a případně dalších periférií. Obvod TOPswitch obsahuje také nadproudovou pojistku, proto není zapotřebí trubičkových pojistek na sekundární straně zdroje. Nadproudová pojistka zdroje je schopna reagovat za mnohem kratší dobu, než trubičková pojistka typu T. Je však nutná pojistka na primární straně zdroje.

### 3.3.6. Návrh plošného spoje

Plošný spoj je opět navržen jako jednostranný, při dodržení funkčních zásad a bezpečnosti. Spoje jsou v náchylných místech vedeny nejkratší možnou cestou při dodržování společných zemnicích bodů. Mezi primárními a sekundárními obvody je vytvořena dostatečně velká izolační mezera.



Obr.3.27:Obrazec DPS zdroje



Obr.3.28:Rozmístění součástek na DPS

# 4. Realizace zařízení

## 4.1. Realizace jednotlivých komponent zařízení

### 4.1.1. Příprava a osazení plošných spojů

Před samotným osazením plošných spojů bylo nutné navinout dle návrhu impulsní transformátor a všechny potřebné cívky. Impulsní transformátor je navinut dle uvedeného návrhu, při dodržení bezpečnostních zásad použitím bezpečnostního okraje vinutí 1,5mm na každé straně vinutí. Tato mezera je vyplněna tenkou teplu odolnou izolační páskou. Mezi primárním vinutím a ostatními vinutími je použita zesílená izolace se slídovou mezivrstvou. Společný zemnicí konec všech vinutí je vyveden na transformátoru samostatně a připraven pro zapájení do plošného spoje. Ostatní konce vinutí jsou připájeny k osazovacím vývodům na kostřičky. Do navinuté kostřičky je vsunuto jádro E. Při neustálém měření indukčnosti primárního vinutí a vkládáním tenkých lakovaných papírků mezi jádro E a I je nastavena indukčnost primárního vinutí na požadovanou hodnotu 206uH, jenž je udána v tab.3.22. V této tabulce je uvedena mimo jiné i přesná velikost mezery v jádru 1,13mm, ovšem výše uvedený postup nastavení indukčnosti primárního vinutí je mnohem přesnější. Sestrojený transformátor je nutné impregnovat transformátorovým lakem, aby se zpevnila celá konstrukce transformátoru a nedocházelo ke změnám jeho parametrů a vibracím transformátoru při provozu. Dále byly dle výše uvedených návodů navinuty také toroidní cívky výstupních LC filtrů. Navinuté cívky jsou také impregnovány transformátorovým lakem pro zpevnění cívek a zabránění rezonančním vibracím vinutí. Osazení plošných spojů proběhlo dle osazovacích plánů uvedených při návrhu jednotlivých komponent a dle osazovacích zásad. Výkonové součástky a součástky tepelně namáhané jsou osazeny alespoň 5mm nad plošný spoj a součástky citlivé na okolní rušení jsou osazeny s co možná nejkratšími vývody. Mezi citlivé součástky na okolní rušení můžeme zařadit například rychlé usměrňovací diody spínaného zdroje, proto jsou vývody těchto diod orientované směrem k transformátoru zkráceny na nejmenší možnou délku. Osazené plošné spoje jsou ze strany pájení opatřeny ochranným lakem.

### 4.1.2. Oživení předzesilovače

Sestavený korekční předzesilovač i s ovládacím panelem po připojení na napájecí napětí fungoval ihned bez jakýchkoli komplikací. Po oživení byla ověřena správná funkce všech možných nastavení předzesilovače a bylo pouze potřeba nastavit pomocí odporových trimrů R13 a R14, potřebnou šířku řídicích impulzů generovaných otáčením rotačního n-kodéru tak, aby bylo dosaženo spolehlivé funkce inkrementace či dekrementace nastavení hlasitosti a ekvalizérů.

### 4.1.3. Oživení spínaného napájecího zdroje

Spínaný napájecí zdroj je potřeba oživovat zapojený na oddělovacím síťovém transformátoru z důvodu bezpečnosti. Po připojení zdroje na napájecí napětí se uvedl zdroj automaticky do režimu standby, ve kterém zdroj setrvává až do připojení zátěže ke zdroji. Při zatížení však start zdroje selhal a začala působit nadproudová ochrana zdroje. Po měření byl zjištěn vysoký odběr usměrňovacího a filtračního obvodu kladného napájecího napětí pro řídicí obvody power stage nf výkonového zesilovače 10V aniž by byl tento výstup zatížen. Toto napájecí napětí má být, jak již bylo řečeno, vztaženo k zápornému napájecímu napětí power stage a to -31V. Proto byl společný bod těchto napájecích napětí spojen přímo v impulsním transformátoru. Při odpojení konce vinutí pro napájecí napětí 10V ze společného bodu nadměrný proud obvodem zmizel a zdroj nastartoval běžným způsobem. Při experimentálním připojení zmíněného konce vinutí kladného napájecího napětí (10V), až za usměrňovací Šotkyho diodu záporného napájecího napětí (-31V) zdroj opět nastartoval bez problémů. Podle tohoto zjištění je také opraven návrh zdroje, takže při případné další konstrukci by se už neměly objevit žádné problémy. Nakonec byl oživený zdroj zkušebně zatížen ohmickou zátěží na výkon 120W, při kterém pracoval zcela bez problémů.

### 4.1.4. Oživení nf koncového výkonového spínačového zesilovacího stupně

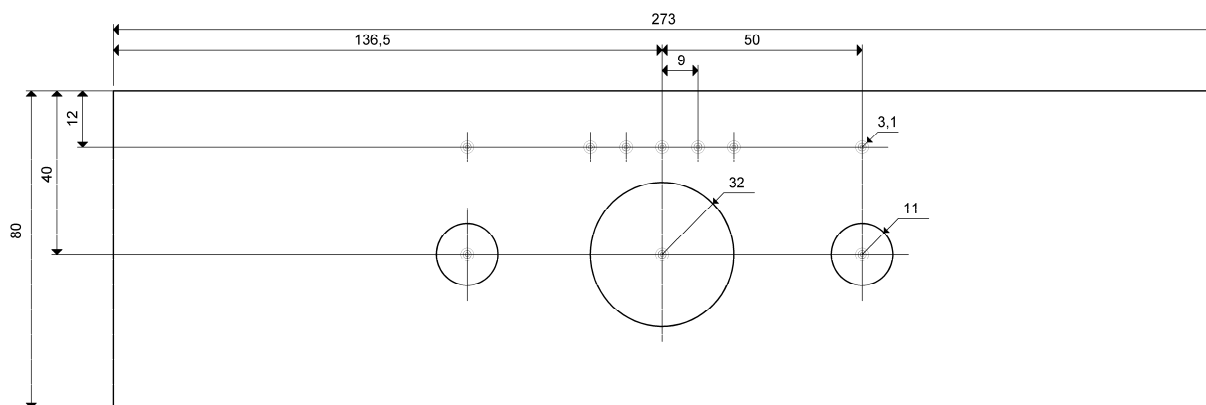
Při prvním oživení koncového nf zesilovacího stupně se rozběhla pouze řídicí část obvodu, kdežto power stage zůstal nečinný s nulovým proudovým odběrem. Při proměření plošného spoje byla nalezena mikroskopická vada v plošném spoji, která znemožnila napájení řídicího obvodu power stage. Při opravení chyby a následném opětovném připojení na napájecí napětí se koncový zesilovací stupně rozběhl bez jakýchkoli potíží. Následně bylo otestováno uvedení obvodu do režimu standby a ochrana při limitaci zesilovače jeho přebuzením. Tyto funkce pracují zcela spolehlivě. O funkci ochrany před vypnutím jakékoli větve napájecího napětí jsem se přesvědčil již při prvním ožívání koncového stupně. Tepelnou ochranu hybridního obvodu zesilovače při použitém chladiči testovat nelze, protože teplota chladiče i při dlouhodobém značném zatížení nepřekročila teplotu 45°C. Test ochrany před zkratem na výstupu zesilovače nepatří mezi standardní a bezpečné testy, proto byl tento test vynechán.

Po oživení všech funkčních částí byly tyto části propojeny do celku a odzkoušena funkčnost zařízení.

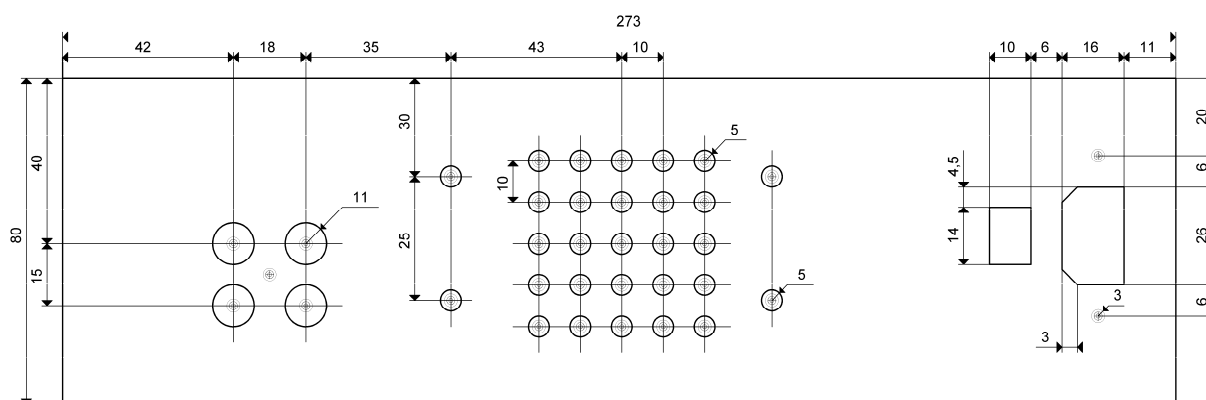
## 4.2. Návrh a realizace šasi pro zařízení

### 4.2.1. Volba materiálu a návrh šasi

Návrh šasi je uveden až zde z toho důvodu, že kdyby došlo k potížím při ožívání zařízení, musela by být pozměněna topologie obvodu a to by mohlo ovlivnit také rozměry plošných spojů. Šasi je proto navrženo na míru až po oživení nf spínačového zesilovače jako celku. Jako výchozí materiál byl pro zhotovení šasi zvolen PVC novodur, jehož použití má mnohé pozitiva. Jeho hlavní výhodou je, že se jedná o nevodivý materiál, proto nebude muset být šasi chráněno před nebezpečným dotykem a zabrání se tím také vzniku zemních smyček. Další výhody jsou v jednoduchosti zpracování materiálu a jeho velmi nízké hmotnosti. Pro zpevnění konstrukce šasi jsou použity dvě vrstvy PVC desek tak, že vnitřní stěny šasi jsou tvořeny odlehčenými PVC deskami o síle 5mm a vnější stěny jsou tvořeny tvrzenými PVC deskami o síle 2mm, spoje v rozích šasi jsou překládány tak, aby vznikl co nejpevnější spoj. Návrh a konstrukční podklady pro realizaci šasi jsou znázorněny následujícími obrázky.



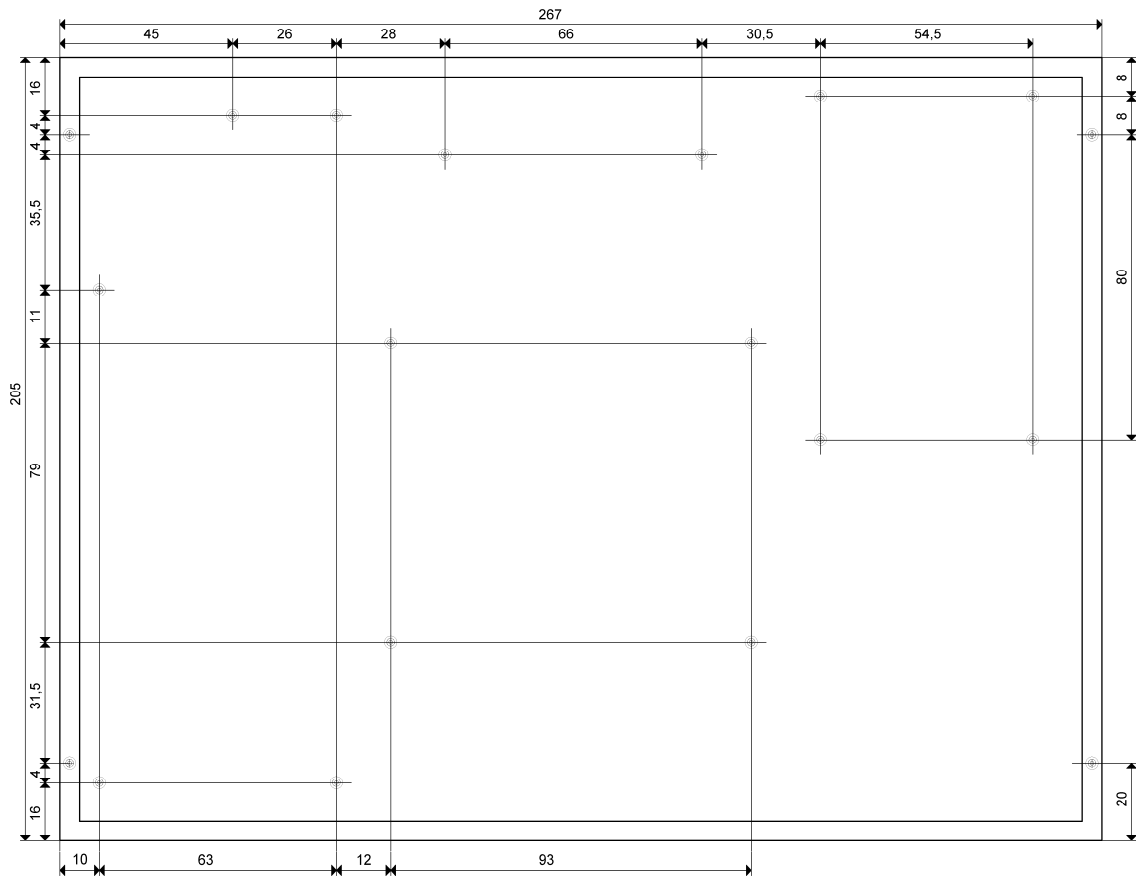
Obr.4.1: Konstrukční náčrt předního panelu zařízení



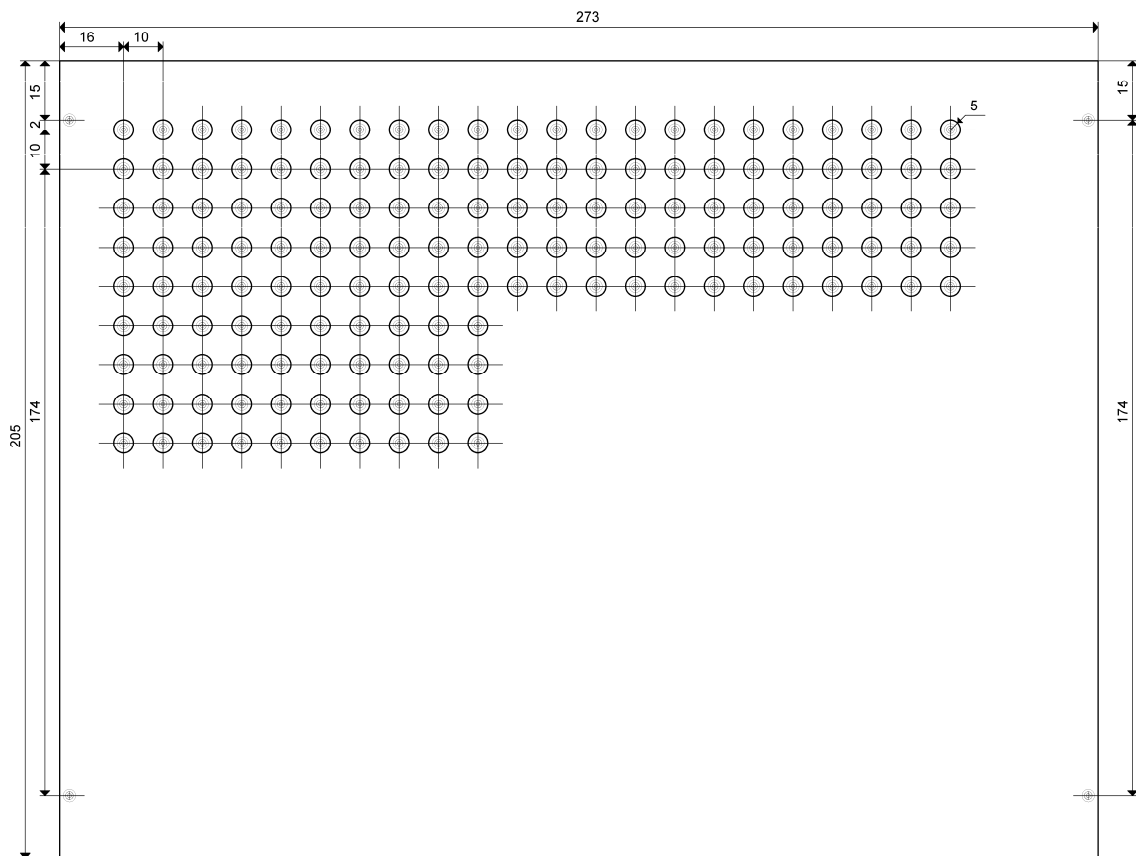
Obr.4.2: Konstrukční náčrt zadního panelu zařízení

| Díl                  | rozměr  | počet kusů | materiál      |
|----------------------|---------|------------|---------------|
| boční stěna          | 80x205  | 2          | 2mm PVC       |
| přední a zadní panel | 80x273  | 2          | 2mm PVC       |
| boční stěna          | 73x194  | 2          | 5mm PVC       |
| přední a zadní panel | 73x268  | 2          | 5mm PVC       |
| podklad              | 251x192 | 1          | 5mm PVC       |
| podklad              | 205x268 | 1          | 2mm PVC       |
| horní kryt           | 205x268 | 1          | 5mm plexisklo |

Tab.4.3: Tabulka rozměrů konstrukčních dílů šasi

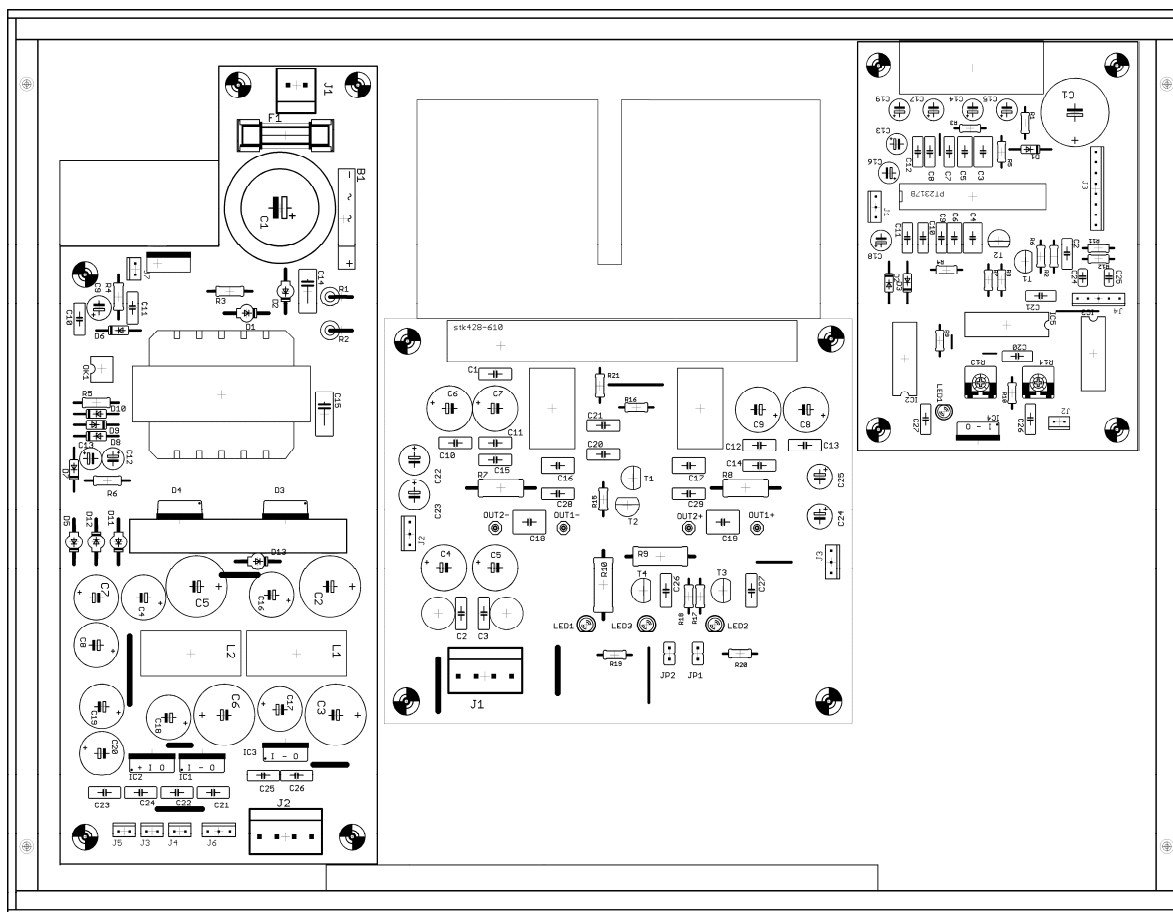


Obr. 4.4: Konstrukční náčrt podkladu zařízení



Obr. 4.5: Konstrukční náčrt horního krytu zařízení

## 4.2.2. Realizace a osazení šasi



Obr.4.6: Konstrukční nákras rozmístění součástí zařízení a spojů šasi

Šasi je sestaveno dle konstrukčního nákrasu zobrazeného na obr.4.6. Jednotlivé díly jsou nařezány na formátové pile. Do těchto dílu pak bylo potřeba odvrtnat všechny funkční a upevňovací otvory a poté mohly být slepeny vulkanickým lepidlem na PVC novodur podle konstrukčního plánu. Takto sestrojené Šasi je opatřeno ochrannou vrstvou laku. Do hotového Šasi jsou pak namontovány všechny plošné spoje včetně příslušných konektorů. Desky plošných spojů jsou upevněny na distančních sloupcích o výšce 6mm. Kabeláž je zafixována stahovacími páskami do vhodně rozmístěných úchytek.

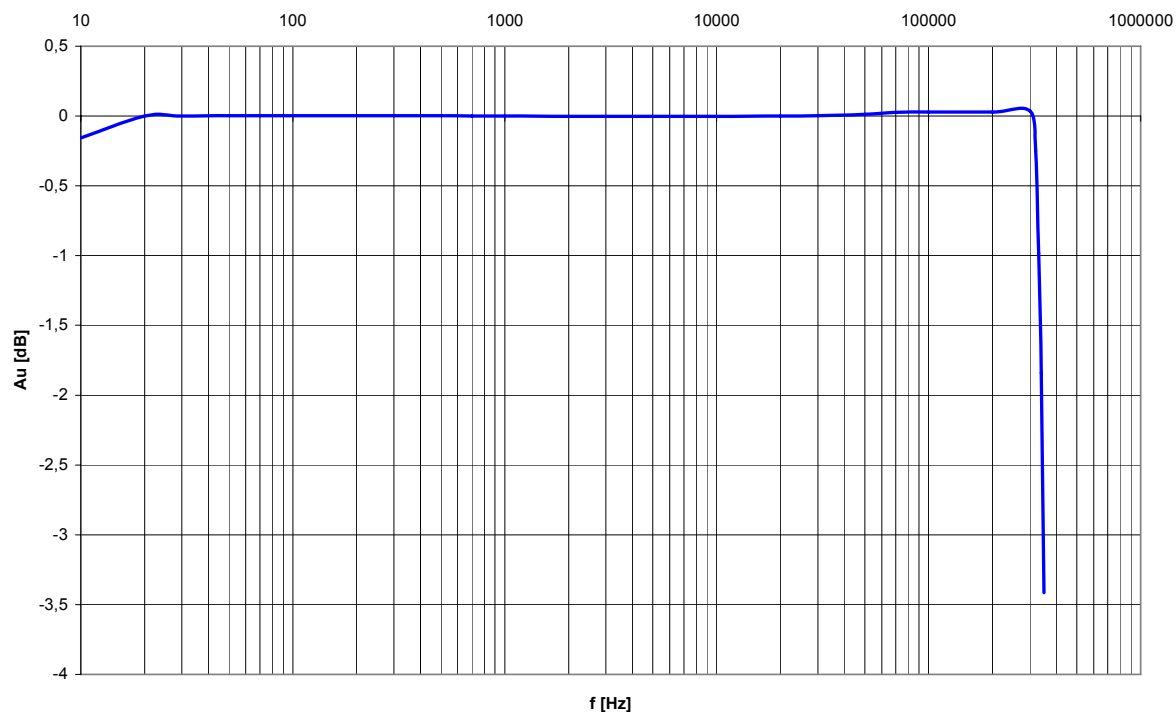
## 4.3. Náklady na realizaci zařízení

| náklady                               | Cena        |
|---------------------------------------|-------------|
| spínaný zdroj                         | 1 052,10 Kč |
| nf koncový výkonový zesilovací stupeň | 921,10 Kč   |
| nf korekční předzesilovač             | 297,50 Kč   |
| ovládací panel                        | 44,60 Kč    |
| konstrukční materiál                  | 431,00 Kč   |
| desky plošných spojů                  | 250,00 Kč   |
| materiál a sestavení Šasi             | 350,00 Kč   |
| Kabeláž                               | 40,00 Kč    |
| zásilková služba                      | 160,00 Kč   |
| cena celkem                           | 3 546,30 Kč |

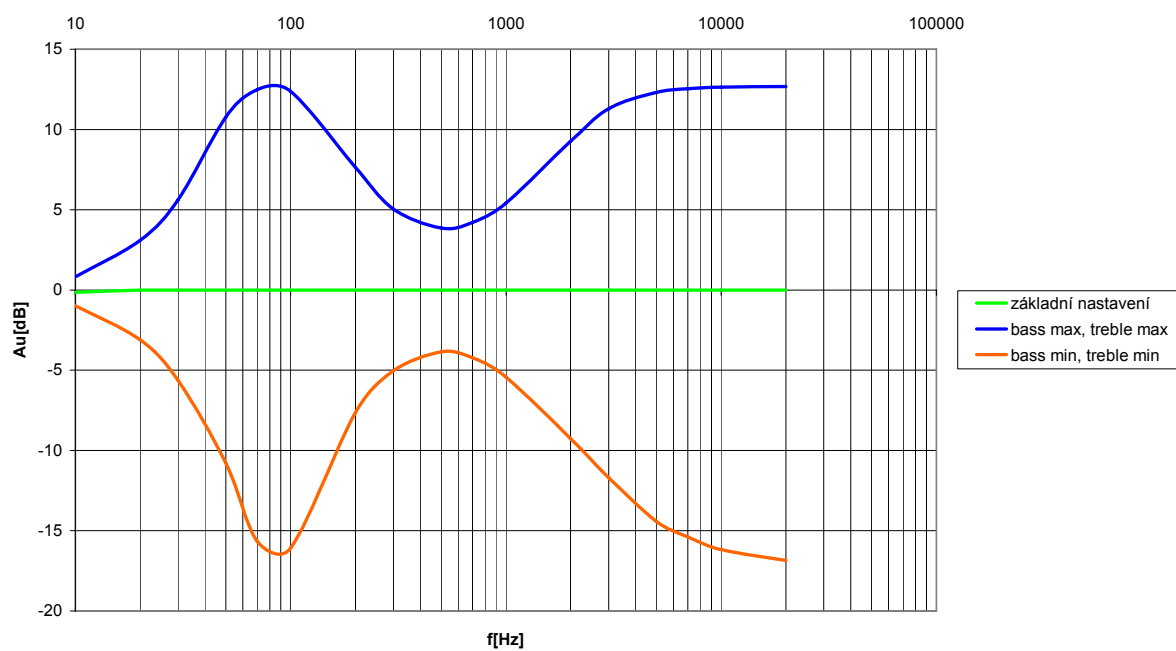
Tab.4.7: Suma všech nákladů na realizaci zařízení

# 5. Výsledky měření a simulací

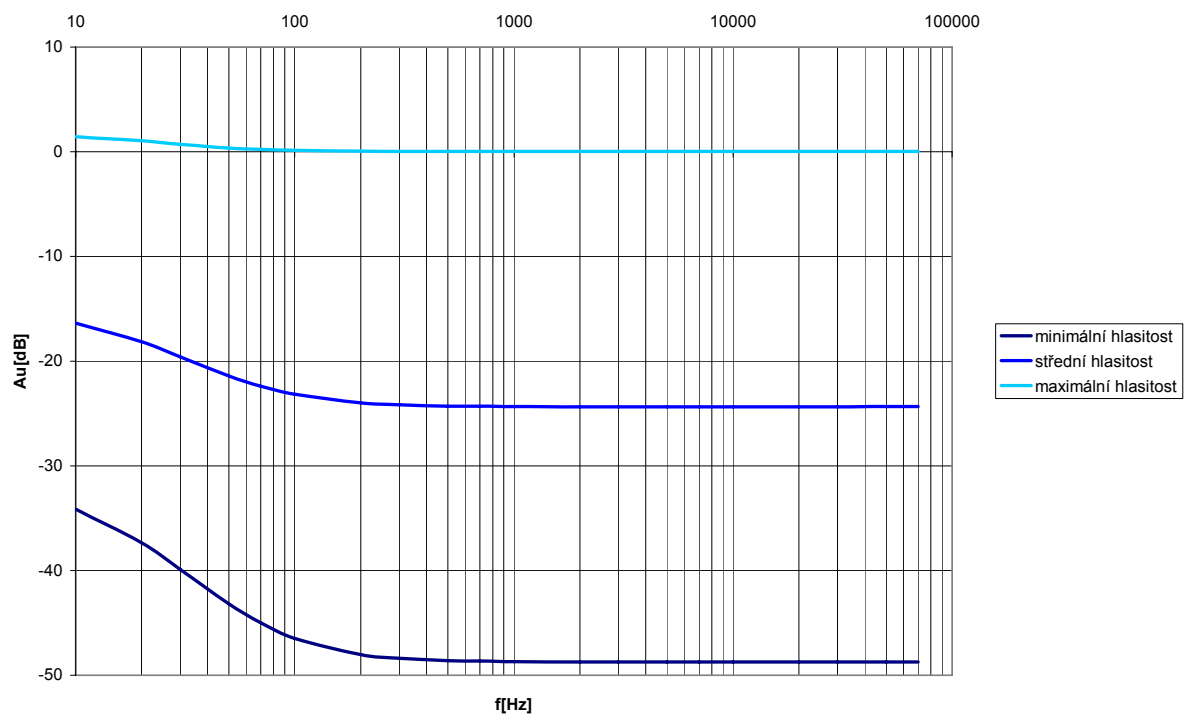
## 5.1. Výsledky měření na korekčním předzesilovači



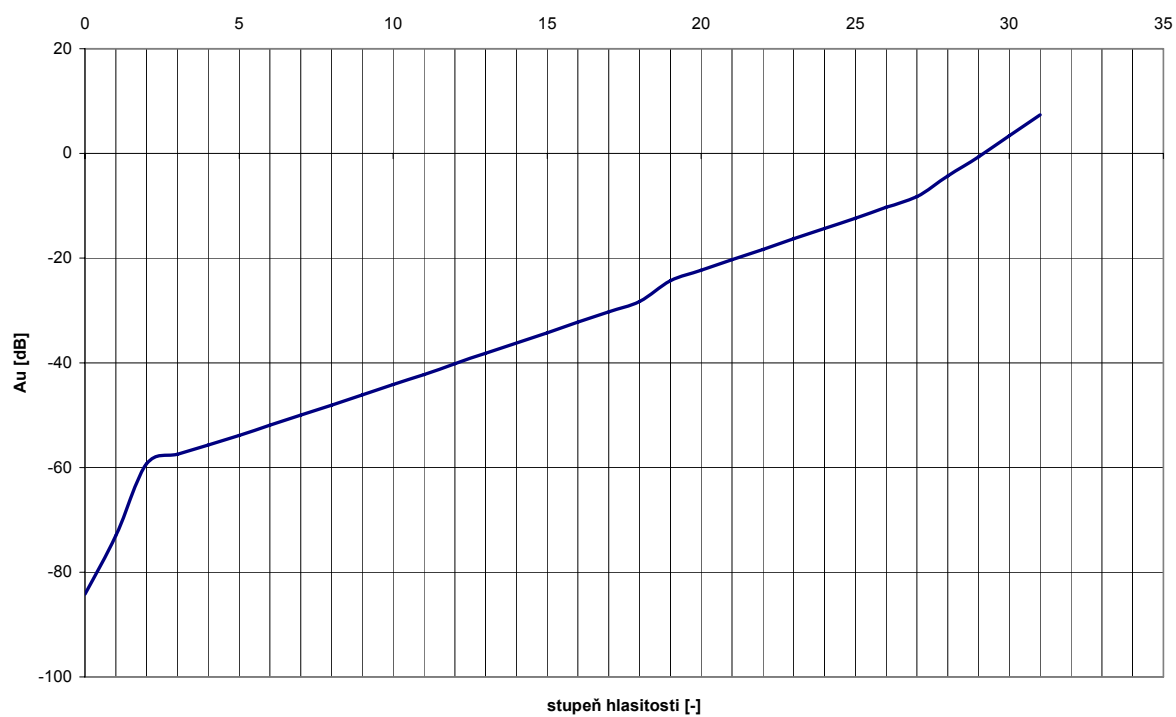
Graf.5.1: Modulová frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače



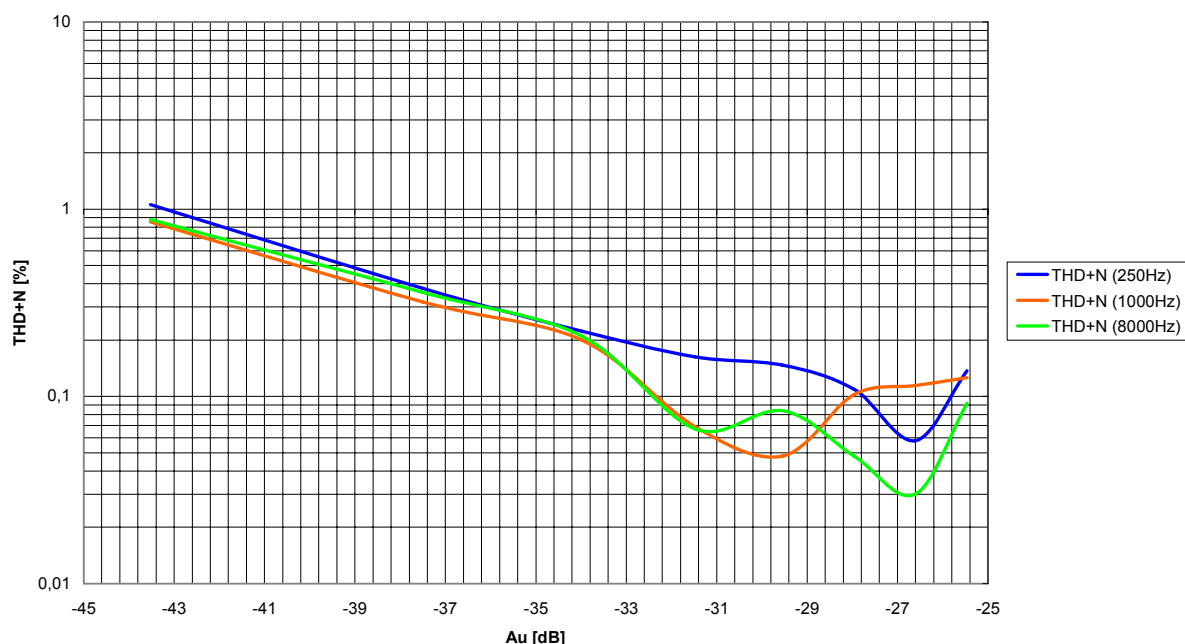
Graf.5.2: Modulová frekvenční charakteristika korekcí předzesilovače



Graf.5.3: Modulovalá frekvenční charakteristika funkce loudness



Graf.5.4: Graf závislosti zesílení předzesilovače na nastaveném stupni hlasitosti

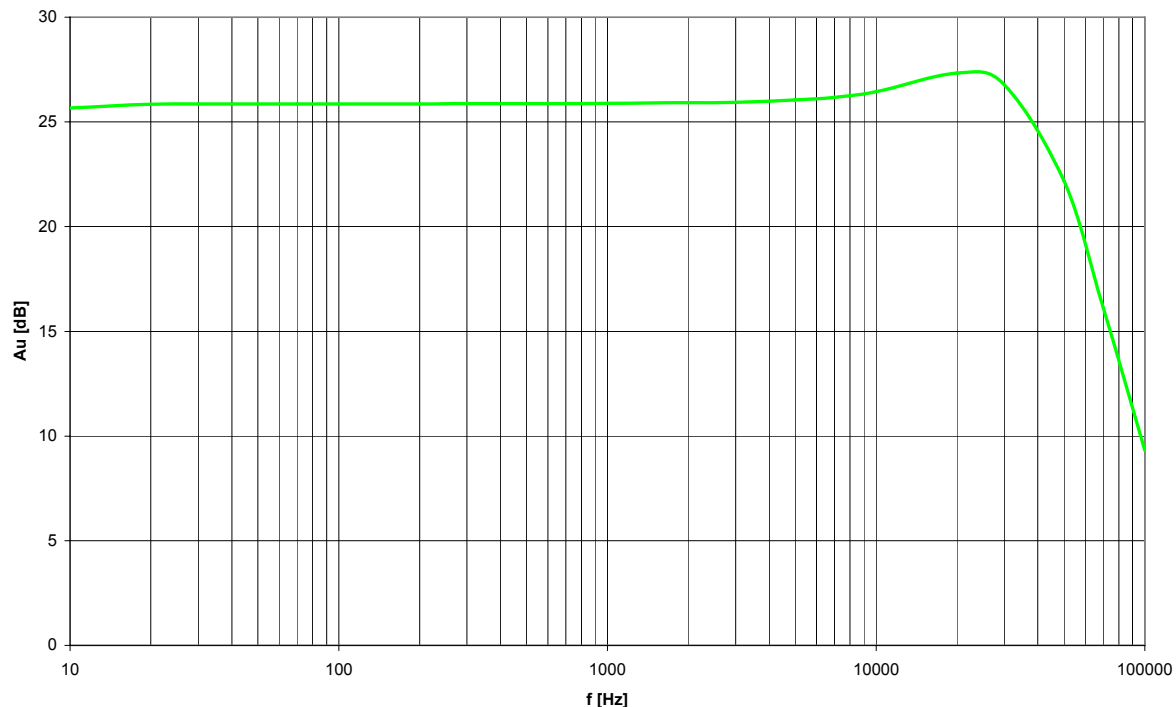


Graf.5.5: Graf závislosti harmonického zkreslení na zesílení předzesilovače

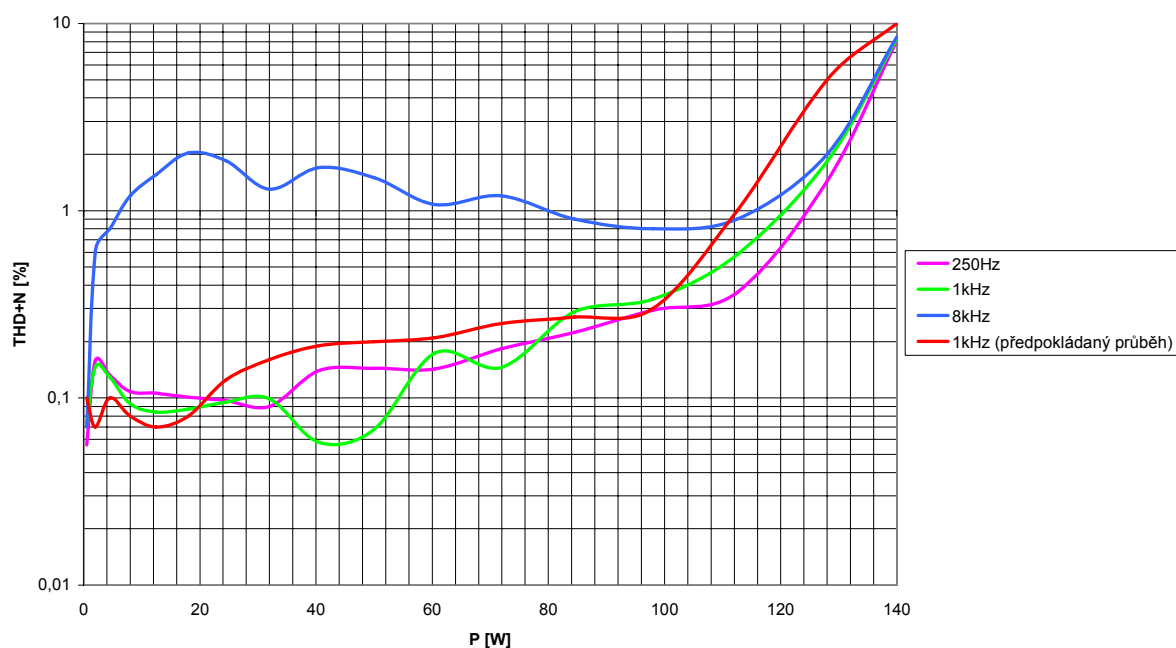
Na korekčním předzesilovači byla provedena měření všech funkcí a jejich výsledky graficky zpracovány. Grafem modulové frekvenční charakteristiky (Graf.5.1.) je přímka v celém rozsahu slyšitelného pásma, přenos předzesilovače klesá pod 3dB až při kmitočtu 350kHz. Graf.5.2. znázorňuje frekvenční modulovou charakteristiku v závislosti na nastaveném ekvalizéru hlubokých a vysokých tónů. Kmitočet pro nastavení hlubokých tónů je 85Hz a kmitočet pro nastavení vysokých tónů se pohybuje od 4kHz až po horní okraj slyšitelného pásma. V těchto pásmech lze dosáhnout zvýraznění o 12dB a potlačení až o 17dB. Pro funkce BALANCE a FADER bylo naměřeno zeslabení pro konkrétně nastavovaný kanál až 82dB v 9krocích nastavení. V dalším grafu označeném jako graf.5.3. je znázorněna pomocí modulové frekvenční charakteristiky funkce LOUDNESS. Tato funkce by měla zvýraznit hluboké a vysoké tóny na nízkých hlasitostech. U použitého audioprocesoru funkce LOUDNESS zvýrazňuje pouze hluboké tóny, ovšem lidský sluch je dle psychoakustického modelu právě na nízké tóny mnohem méně citlivý, než na vysoké tóny. V ostatních ohledech tato funkce pracuje dle očekávání, projevuje se nejvíce na nízkých hlasitostech a současně s nastavováním vyšší hlasitosti je vliv funkce LOUDNESS potlačován. Také zvýraznění hlubokých tónů touto funkcí není přehnané, jak tomu bývá u mnohých komerčních audiozařízení. Na grafu 5.4. můžeme vidět závislost zesílení korekčního předzesilovače v závislosti na nastaveném stupni hlasitosti, na tomto průběhu si můžeme všimnout, že charakteristika je lineární téměř v celém rozsahu, až na velmi nízkou a vysokou hlasitost, kdy se mění krok nastavení. U nízké hlasitosti se v posledních dvou krocích nastavení změnil krok ze 2dB až na 12dB a to proto, aby došlo k co největšímu potlačení zvuku. U vysoké hlasitosti se také měnil krok z 2dB na 4dB. Dle údajů výrobce by měl audio procesor v základním nastavení pracovat pouze v režimu potenciometru, tudíž bychom měli dosáhnout maximálního nastavení hlasitosti na 0dB, při měření měl však audioprocesor získat při nejvyšší nastavené hlasitosti přibližně 7dB. Na posledním grafu (Graf.5.5.) můžeme vidět závislost harmonického zkreslení předzesilovače na nastavené hlasitosti. Výrobce udává hodnotu zkreslení menší než 0,1%, takovéto zkreslení můžeme naměřit v druhé polovině nastavení hlasitosti, kdy se zkreslení pohybuje okolo uvedené hodnoty 0,1% avšak při snižování hlasitosti zkreslení narůstá až k hodnotě 0,9%. Proto při provozu zesilovače je lepší ztlumit zdroj signálu a hlasitost zesilovače naopak nastavit na vyšší hodnotu. Dále byl na předzesilovači změřen vstupní odpor, jenž odpovídá hodnotě přibližně 20kΩ, u doby

průběhu byla naměřena hodnota 4,2V/ms, přeslech mezi kanály byl -65dB. Nakonec byla změřena vstupní citlivost předzesilovače, která měla hodnotu 6,5mV.

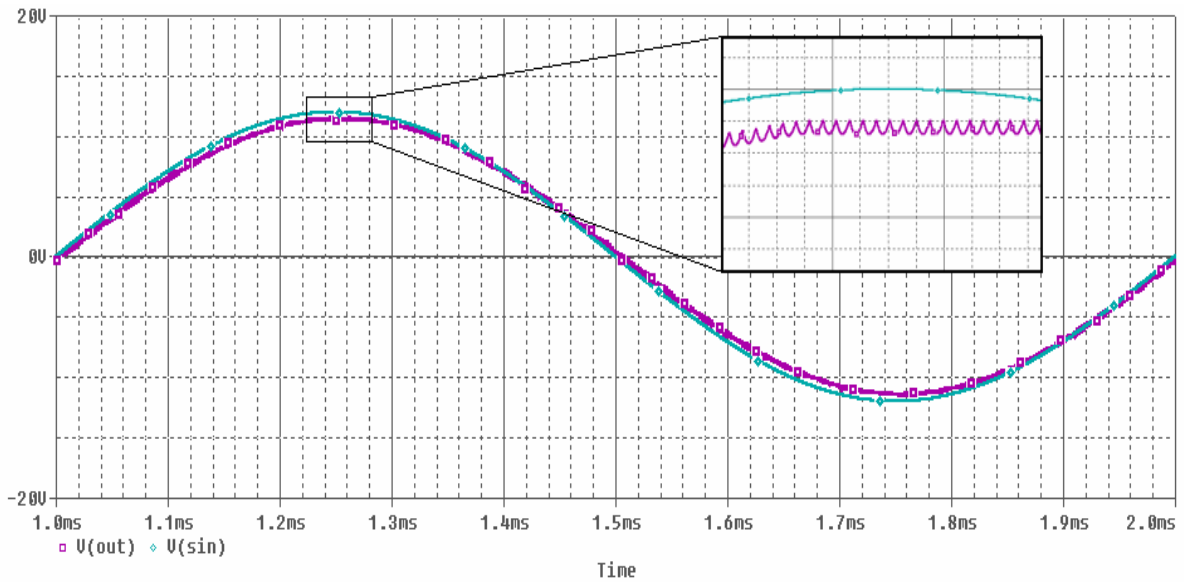
## 5.2. Výsledky měření a simulací koncového nf spínačového zesilovače a spínaného napájecího zdroje



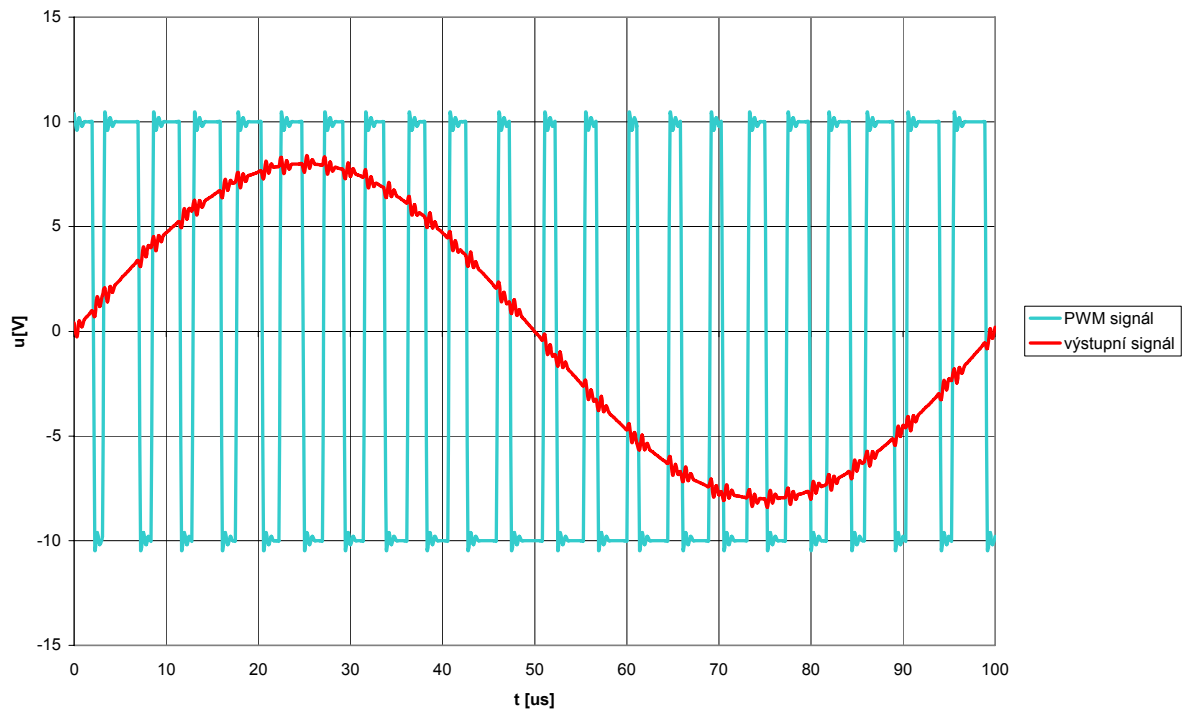
Graf.5.6:Modulová kmitočtová charakteristika nf koncového zesilovacího stupně



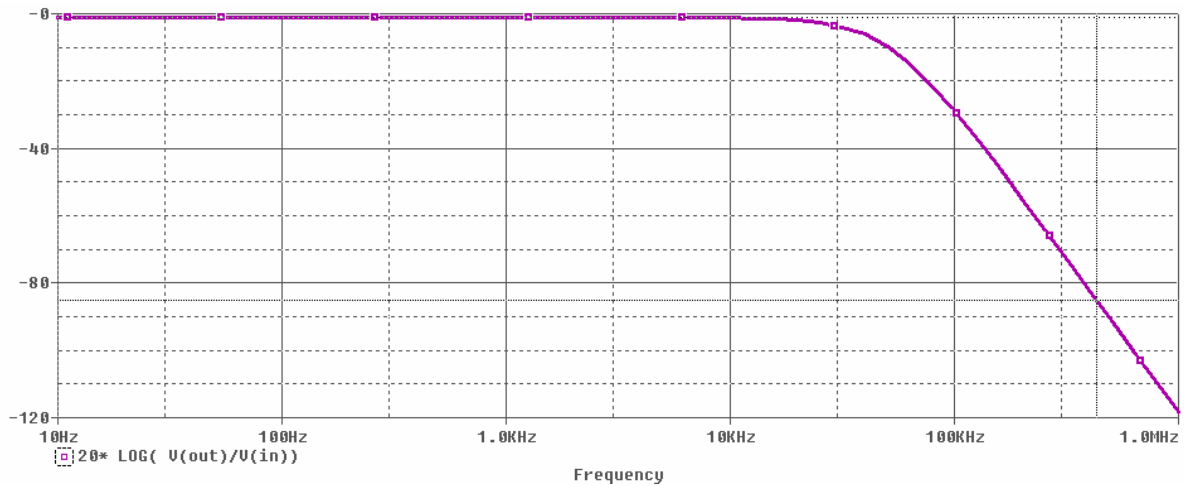
Graf.5.7: Graf závislosti harmonického zkreslení na výstupním výkonu



Obr.5.8: Předpokládaný průběh výstupního signálu na základě simulace v programu Pspice



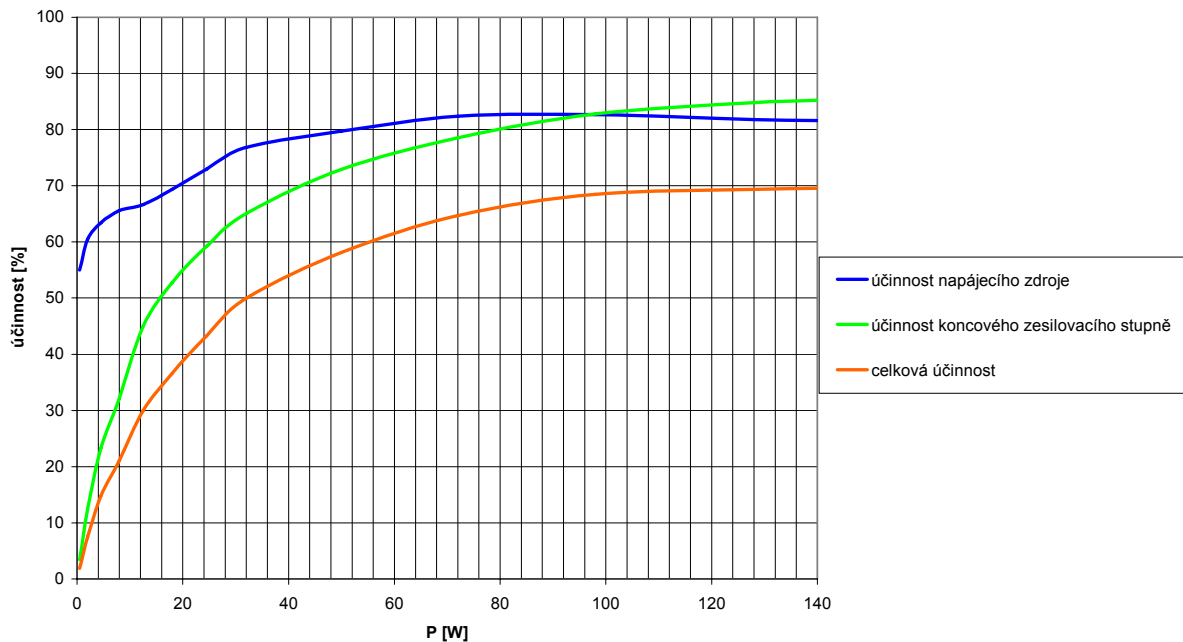
Obr.5.9: Oscilogram průběhu PWM signálu a výstupního signálu nf koncového zesilovacího stupně



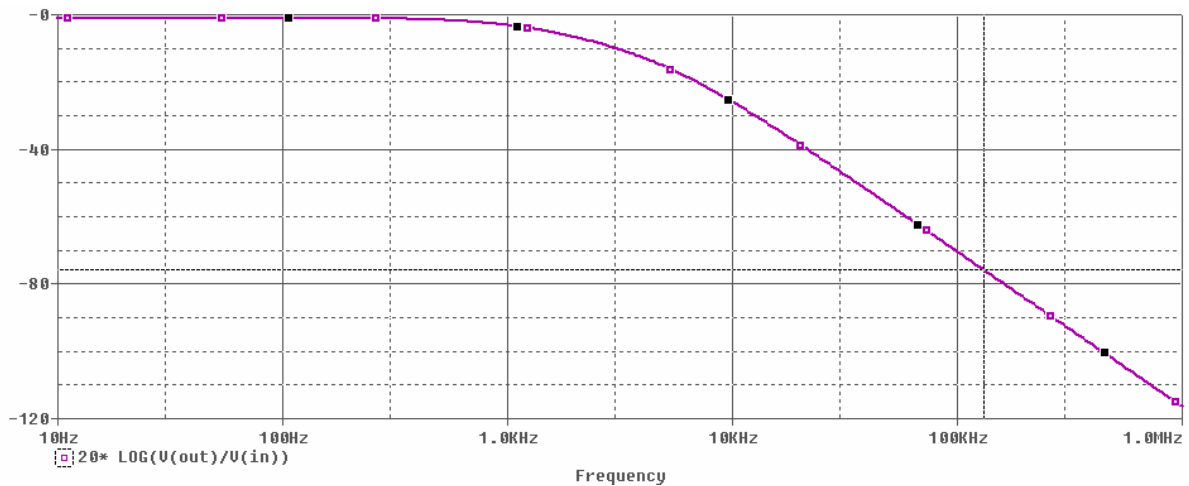
Obr.5.10: Předpokládaná frekvenční charakteristika výstupního LC filtru nf koncového zesilovacího stupně.

| parametr                         | Hodnota     |
|----------------------------------|-------------|
| max. výstupní výkon              | 2 x 69Wrms  |
| doba přeběhu                     | 0,8V/us     |
| vstupní odpor                    | 4k $\Omega$ |
| výstupní odpor                   | Neměřitelné |
| fázový posuv výstupu vůči vstupu | 72°         |
| základní šum                     | 1,8mV       |

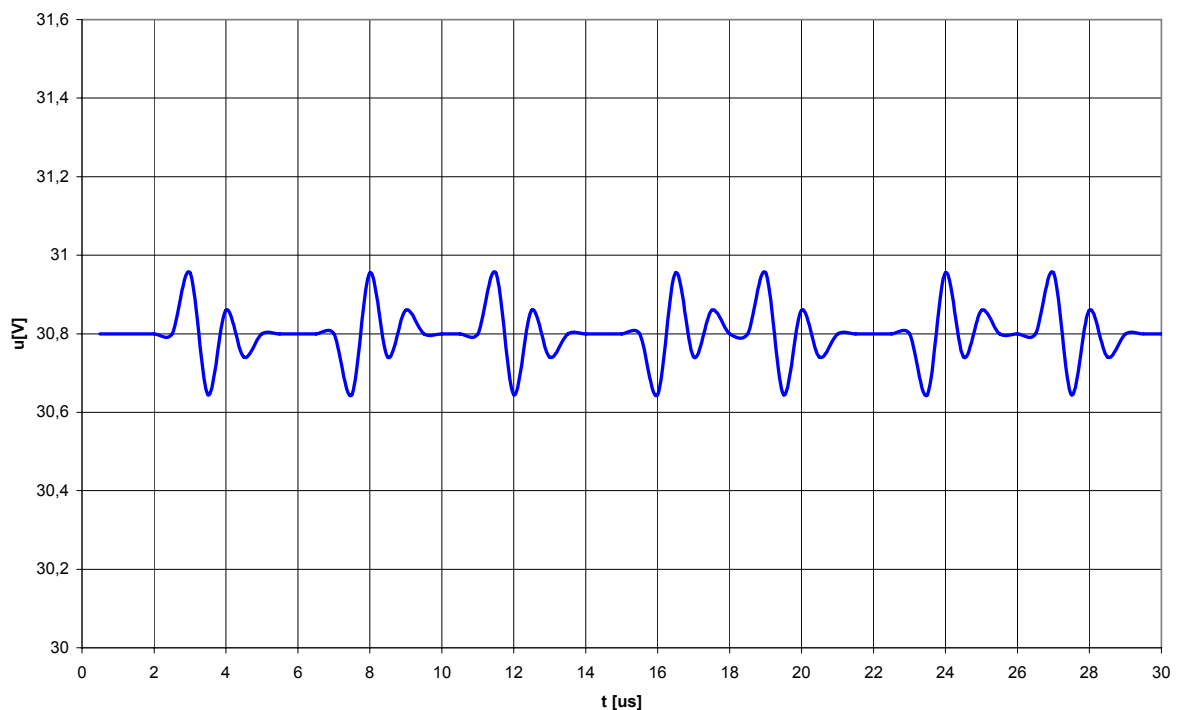
Tab.5.11: Tabulka dalších naměřených parametrů koncového zesilovacího stupně.



Graf.5.12: Graf závislosti účinnosti zařízení na výstupním výkonu.



Obr.5.13: Modulová frekvenční charakteristika LC filtru spínaného napájecího zdroje



Obr.5.14: Oscilogram zatíženého výkonového napájecího napětí zdroje

Na nf koncovém spínačovém zesilovacím stupni bylo provedeno měření všech základních parametrů. Na prvním z grafů (Graf.5.6.) je zobrazena modulová frekvenční charakteristika koncového zesilovacího stupně, která je téměř lineární v celém slyšitelném pásmu a klesá o 3dB až při 40KHz. V dalším grafu (Graf.5.7.) je zobrazena závislost harmonického zkreslení zesilovače na jeho výstupním výkonu. Pro větší přehlednost je stupnice THD+N zvolena v logaritmickém měřítku. Tuto charakteristiku můžeme rozdělit na tři úseky, a to od nuly do 40W výstupního výkonu, což je výkon dostatečný pro běžný domácí poslech, kdy se zkreslení pohybuje okolo 0,1%, což byla předpokládaná hodnota. Další úsek je od 40W do 100W výstupního výkonu zesilovače, pro hlasitý poslech. V tomto úseku dochází k mírnému zvýšení harmonického zkreslení až na 0,3%. Posledním úsekem je rozmezí výkonů nad 100W až po maximální výkon 140W, zde dochází k výraznému zvýšení THD+N až na hodnotu 8%, což je u spínačových nf zesilovačů běžné. Takový výstupní výkon však bude využíván jen velmi zřídka a to spíše v hlučném prostředí. Dále na grafu můžeme vidět, že dle křivky předpokládaného průběhu THD+N při 1kHz převzatého

z datasheetu [4], bylo dosaženo lepších výsledků než udává výrobce. Dále také můžeme vidět výrazný vliv vyšších frekvencí vstupního nf signálu na THD+N, z principu funkce spínačových zesilovačů je zřejmé, že při vyšších vstupních kmitočtech dochází také k nárůstu THD+N, jak je vidět na křivce měřené při 8kHz. Obr.5.8. znázorňuje simulaci průběhu výstupního signálu o kmitočtu 10kHz po průchodu LC filtrem, tento průběh si můžeme srovnat s průběhem na následujícím obrázku (Obr.5.9.), jenž je oscilogramem reálného měření. Skutečný průběh se od simulovaného liší vlivem zákmity na hranách pulzů PWM signálu na výstupní odfiltrovaný signál. Tyto zákmity jsou způsobeny parazitními kapacitami, indukčnostmi a převážně vlivem setrvačnosti spínacích prvků a bez přesného modelu obvodu nemohly být do simulace zahrnuty. Graf.5.10. znázorňuje modulovou frekvenční charakteristiku výstupního LC filtru koncového zesilovacího stupně, na které je vyznačen spínací kmitočet 430kHz, při němž má filtr útlum 85dB. V tabulce (Tab.5.11.) jsou uvedeny další naměřené parametry koncového zesilovacího stupně. Tyto parametry odpovídají údajům uvedeným výrobcem. Výstupní odpor zesilovače není měřitelným z toho důvodu, že po odpojení zátěže od zesilovače dojde automaticky k přerušení spínání daného kanálu, proto nemůže být naměřeno výstupní napětí naprázdno. Následující graf.5.12. znázorňuje nejperspektivnější parametr tohoto zařízení a tím je účinnost. Průběh účinnosti koncového zesilovacího stupně dosahuje hodnoty 85%. Účinnost zdroje je také velmi dobrá, pohybuje se v okolí 80%. Celková účinnost zařízení dosahuje při maximálním výkonu až 70%, díky které mohlo být využito pouze pasivní chlazení zařízení. Při použití koncového výkonového zesilovače ve třídě AB, jenž dosahuje účinnosti 60% a klasického zdroje s toroidním transformátorem o účinnosti 75% bychom dosáhli celkové účinnosti pouhých 45%, což by si vyžádalo řízené aktivní chlazení zařízení.

Obr.5.13. znázorňuje odsimulovanou frekvenční charakteristiku, vybraného LC filtru spínaného napájecího zdroje, v programu Pspice. Je zde opět vyznačen spínací kmitočet napájecího zdroje 130kHz, pro něž má filtr útlum 76dB. Na posledním obrázku (Obr.5.14.) je znázorněn oscilogram napájecího napětí 31V pro napájení power stage koncového zesilovacího stupně při celkovém zatížení zdroje 120Wrms. I při takovémto zatížení nepřekračuje kreslení napájecího napětí 0,5%. Toto zkreslení je opět způsobeno zákmity na hranách pulzů PWM signálu před LC filtrem a svým kmitočtem leží zcela mimo oblast slyšitelného pásma. Při použití napájecího zdroje s transformátorem by toto zkreslení mělo síťový kmitočet 50Hz a mohlo by být zdrojem slyšitelného brumu na výstupu zesilovače.

### 5.3. Zhodnocení měření

Měřením základních parametrů na jednotlivých částech zařízení byla ověřena správná funkce zařízení a hodnoty jednotlivých parametrů byly srovnány s hodnotami udávanými výrobcem. Shrnutí těchto parametrů je názorně zpracováno v následující tabulce (Tab.5.15.). Z této tabulky můžeme vyčíst, že u nf koncového spínačového výkonového zesilovacího stupně s obvodem SANYO STK428-610 bylo dosaženo přibližně stejných, v některých případech dokonce lepších parametrů, než udává výrobce. Velmi přívětivých hodnot bylo dosaženo u harmonického zkreslení koncového stupně. Je tedy zřejmé, že výrobce SANYO udává u svého výrobku pravdivé informace. Při srovnání naměřených a katalogových údajů korekčního předzesilovače, můžeme vidět, že při měření docházelo k mírným, z velké části zanedbatelným odchylkám od údajů uváděných výrobcem Princeton technology. Poměrně velkým zklamáním však byl nárůst harmonického zkreslení předzesilovače směrem k nízkým hodnotám hlasitosti, kdy harmonické zkreslení dosahovalo hodnoty až 0,9%, což je 9x více než udává výrobce. Hodnot harmonického zkreslení udávaných výrobcem (<0,1%) je předzesilovačem dosaženo pouze v druhé polovině nastavené hlasitosti a to při přenosu nad -33dB. Dalšími změřenými parametry jsou parametry zdroje. Tyto parametry jsou však nejvíce závislé na správném návrhu zdroje a parametrech obvodových součástek, nikoliv na parametrech řídicího obvodu. Proto se vlastnosti různě navržených zdrojů mohou výrazně lišit. Při návrhu zdroje jsou vstupními údaji minimální či maximální hodnoty dosažených

parametrů. Příkladem může být námi navržený zdroj s předpokládanou průměrnou hodnotou účinnosti 73%, této účinnosti bylo také dosaženo na reálném zdroji. Dalším důležitým parametrem je zkreslení výstupního napětí zatíženého zdroje. Tento parametr je závislý nejvíce na druhu použité zpětné vazby a také na výstupním LC filtru. Pro zvolenou zpětnou vazbu s optronem a zenerovými diodami byla předpokládaná hodnota zvlnění napětí zatíženého zdroje menší než 1% při konstantním vstupním napětí. U reálného zdroje bylo dosaženo polovičního zkreslení a to 0,5%. Celkově bylo dosaženo správným návrhem zařízení velmi dobrých výsledků.

| parametr                                    | změřeno        | udáváno výrobcem | Poznámka         |
|---|----------------|------------------|------------------|
| maximální výstupní výkon                    | 2 x 69Wrms     | 2 x 70W          |                  |
| maximální příkon                            | 200Wrms        | < 225Wrms        |                  |
| příkon ve stavu standby                     | 4Wrms          | Neuvedeno        |                  |
| minimální zatěžovací impedance              | 4Ω             | 4Ω               |                  |
| zkreslení zdroje                            | 0,50%          | < 1%             | P=120W           |
| celková účinnost                            | 70%            | > 55%            | max. výkon       |
| účinnost koncového zesilovače               | 85%            | 87%              | max. výkon       |
| účinnost napájecího zdroje                  | 73%            | 73%              |                  |
| maximální provozní teplota koncového stupně | neměřeno       | 105°C            |                  |
| základní šum koncového stupně               | 1,3mVrms       | 1mVrms           |                  |
| vstupní citlivost předzesilovače            | 6,1mV          | Neuvedeno        |                  |
| vstupní odpor předzesilovače                | 20kΩ           | 10kΩ             |                  |
| výstupní odpor předzesilovače               | 120Ω           | 100Ω             |                  |
| vstupní odpor koncového stupně              | 4kΩ            | 4,7kΩ            |                  |
| výstupní odpor koncového stupně             | neměřitelné    | Neuvedeno        |                  |
| odstup S/N předzesilovače                   | 89dB           | 85dB-95dB        |                  |
| THD+N korekčního předzesilovače             | 0,10%          | < 0,10%          | přenos nad -33dB |
|   | < 1%           | < 0,10%          | přenos pod -33dB |
| THD+N koncového stupně                      | 0,10%          | 0,10%            | P<2x20W          |
|   | 0,20%          | 0,20%            | P<2x50W          |
|   | 8%             | 10%              | Max              |
| doba přeběhu předzesilovače                 | 4,2V/ms        | 2V/ms            |                  |
| doba přeběhu koncového stupně               | 0,8V/us        | Neuvedeno        |                  |
| rozsah regulace hlasitosti předzesilovačem  | -84dB až 7dB   | -68dB až 0dB     |                  |
| rozsah regulace nízkých a vysokých tónů     | -17dB až +12dB | -16dB až +16dB   |                  |
| rozsah regulace balance a fader             | 0dB až -82dB   | 0dB až -80dB     |                  |

Tab.5.15: Shrnutí parametrů celého zařízení a srovnání s údaji výrobce

## 6. Závěr

Cílem této práce bylo získání znalostí o spínačových technologiích v oblasti výkonové nízkofrekvenční elektroniky a jejich následné využití. Na počátku tohoto projektu byly zmapovány konkrétní třídy spínačových výkonových nf zesilovačů, principy jejich činnosti a dostupnost v integrované podobě. Následoval výběr konkrétního integrovaného řešení koncového nf zesilovacího stupně spolu s výběrem vhodného korekčního předzesilovače dle požadavků zadání projektu a také napájecího zdroje pro samostatnou činnost zařízení. Volba a realizace napájecího zdroje byla nad rámec zadání. Už výběrem vhodných komponent byla dosažena velice moderní koncepce celého zařízení, a to v mnoha ohledech. Zároveň však byly předpokládány velmi dobré parametry zařízení. Moderní koncepci zařízení přispěl velkou mírou spínaný napájecí zdroj řízený obvodem TOPswitch GX249Y, díky jemuž došlo k výraznému snížení hmotnosti celého zařízení, snížení ceny a zároveň ke zvýšení odolnosti zařízení na rušivé vlivy zemnicími smyčkami. Výrazně bylo zařízení zmodernizováno také použitím audioprocesoru PT2317B společnosti Princeton, jakožto korekčního předzesilovače ovládaného pouze rotačním n-kodérem se zabudovaným tlačítkem, kdy jednotlivé funkce korekcí či nastavení se volí stiskem n-kodéru a jejich hodnota se nastavuje otáčením n-kodéru. Pro zapnutí či vypnutí funkce LOUDNESS slouží samostatné tlačítko. Samotným jádrem zařízení je však koncový nf zesilovací stupeň. Jeho výběru byla věnována značná pozornost. Svými parametry, dostupností a konstrukční jednoduchostí zvítězil hybridní obvod vyvinut pro výrobce SANYO vyhlášenou vývojovou společností v oblasti audiotechniky Bang & Olufsen ICE POWER. Tento hybridní obvod s označením STK428-610 je vyráběn pro vyspělé multifunkční audio-video systémy společnosti JVC a svými parametry, jako je výstupní výkon 2x70Wrms, vysoká účinnost a velmi malé harmonické zkreslení, se řadí mezi velmi kvalitně a moderně řešené zesilovače pracující ve třídě D.

U spínačových technologií založených na principu pulzně šířkové modulace nabývají spínací kmitočty hodnot několika stovek kHz. Při těchto kmitočtech bylo nutné při návrhu zařízení dodržovat do jisté míry zásady vysokofrekvenčního návrhu. Správné dodržení těchto zásad mohlo být základem správné funkce zařízení a dosažení předpokládaných parametrů. Po úspěšném oživení celého zařízení, byla měřeními potvrzena správná funkce zařízení a dosažení předpokládaných výsledků. Pro ujištění o správné funkci výstupních LC filtrů koncového zesilovače a napájecího zdroje byly navíc namodelovány pomocí simulačního programu Pspice také modulové frekvenční charakteristiky těchto filtrů. Tyto simulace byly nutné zvláště pro ujištění, zda rezonanční kmitočty těchto filtrů neleží v blízkosti spínacích kmitočtů. Dle zpracovaných výsledků měření je zřejmé, že bylo dosaženo velmi dobrých parametrů zařízení a byl tak nad rámec splněn celý rozsah zadání.

Nakonec ještě můžeme uvést možnosti rozšíření tohoto zařízení. Jako první možnost rozšíření tohoto výkonového audio zesilovače je zařazení do kvadrofonního systému doplněním o další stereofonní výkonový zesilovač připojený na částečně nezávisle řízený nízkourovňový výstup korekčního předzesilovače. Celá kvadrofonní sestava by tak mohla být nastavována a řízena pouze jedním ovládacím členem. Z jednoduchého řešení řízení předzesilovače pouze čtyřmi řídicími signály plyne možnost snadného rozšíření předzesilovače o dálkové ovládání. K dálkovému ovládání všech funkcí zařízení včetně jeho uvedení do stavu STANDBY, k čemuž slouží samostatné tlačítko na předním panelu přístroje, by postačilo pouze pět ovládacích kanálů, ne celkem sedm funkcí.

# 7. Seznam literatury

- [1] Wikipedia, [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com) , elektronická encyklopedie,
- [2] SANYO Electric Co., Ltd Semiconductor Company, <http://www.semiconductor-sanyo.com>, Product information STK428-600 series, November 17, 2004,
- [3] Bang & Olufsen ICE power, <http://www.icepower.bang-olufsen.com>
- [4] SANYO Electric Co., Ltd Semiconductor Company, <http://www.semiconductor-sanyo.com>, SPECIFICATION STK428-610-E, 09.02.2005,
- [5] SANYO Electric Co.,Ltd. SC MS-BU General-Purpose Power Development Dept. Audio HIC, <http://www.semiconductor-sanyo.com>, STKaudio Presentation, December 2005,
- [6] Princeton Technology Corp., <http://www.princeton.com.tw> , PT2317B Datasheet, August 1998,
- [7] A. Krejčířík, Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch, BEN-technická literatura, 2002,
- [8] Power Integration, Inc., <http://www.powerint.com>, TOPSwitch-GX Application note AN-29, February 2003,
- [9] Power Integration, Inc., <http://www.powerint.com>, TOP249 Datasheet, 07/2001,
- [10] Power Integration, Inc., <http://www.powerint.com>, Design Idea DI-31 TOPSwitch-GX, December 2002,
- [11] James A. Svoboda, PSpice for Linear Circuits, Wiley, 2007,
- [12] Crown audio, [www.crownaudio.com](http://www.crownaudio.com) , Understanding class I,
- [13] Tripath, [www.tripath.com](http://www.tripath.com) , Class T specification,
- [14] LAB.GRUPPEN, [www.labgruppen.com](http://www.labgruppen.com) , ClassTD\_Technote\_9.pdf,
- [15] Zetex, [www.zetex.com](http://www.zetex.com) , DDFA Overview

## 8. Seznam zkratek a symbolů

**PWM** – pulzně šířková modulace, pulse width modulation  
**THD+N** – úplné harmonické zkreslení plus šum  
**FEEDBACK** – zpětná vazba  
**TREB** – treble, vysoké tóny  
**BASS** – bass, hluboké tóny  
**LOUDNESS** – funkce vyvážení citlivosti ucha na nízké a vysoké tóny při různé hlasitosti  
**N-CODER** – rotační snímač polohy  
**DKO** – klopný obvod typu D  
**MKO** – monostabilní klopný obvod  
**JUMPER** – zkratovací propojka  
**SWITCH** – spínač, spínání  
**POS** - inkrementace  
**NEG** - dekrementace  
**SEL** – select, výběr funkce  
**VD** – kladné výkonové napájecí napětí  
**VS** – záporné výkonové napájecí napětí  
**VDR** – napájecí napětí řídicích obvodů  
**VDS** – kladné napájecí napětí analogových obvodů  
**VDD** – záporné napájecí napětí analogových obvodů  
**DVD** – napájecí napětí digitálních obvodů  
**GND** – výkonové zemnění  
**GND A** – zemnicí svorka analogových obvodů  
**POWER STAGE** – výkonová část koncové nf zesilovacího stupně  
**L [H]** – indukčnost [henry]  
**AI [nH/z<sup>2</sup>]** – indukční konstanta jádra  
**N** – počet závitů vinutí  
**S [mm<sup>2</sup>]** – průřez vodiče  
**d [mm]** – průměr vodiče  
**I [A]** – proud [Ampér]  
**U [V]** – napětí [Volt]  
**P [W]** – výkon [Watt]  
**PIVS [V]** – závěrné průrazné napětí usměřovače  
**ODS [mm]** – průměr vodiče s izolací  
**M [mm]** – bezpečnostní izolační mezera

# 9. Přílohy

## 9.1. Fotografie

