

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2019

Martin Strážnický



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## AUDIO ZESILOVAČ S PŘEPÍNATELNÝMI VSTUPY A MIKROPROCESOROVÝM ŘÍZENÍM

AUDIO AMPLIFIER WITH SWITCHABLE INPUTS AND MICROCONTROLLER CONTROL

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Strážnický

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Martin Strážnický

**ID:** 167427

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### **Audio zesilovač s přepínatelnými vstupy a mikroprocesorovým řízením**

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete blokovou a obvodovou strukturu stereofonního audio zesilovače, který by integroval přepínač 6 vstupů střední citlivosti s mikroprocesorovým řízením pomocí relé, předzesilovač s fyziologickou a tónovou korekcí, sluchátkový zesilovač a koncový zesilovač s diskretními prvky a oddělenou konstrukcí pro jednotlivé kanály. Pro mikroprocesorové řízení přepínání vstupů předpokládejte procesor Atmel Atmega a řízení enkodérem. Zapojení koncového stupně doplňte ochranou reproduktorů a zpoždění sepnutí po zapnutí.

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

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN – technická literatura, 2003.

[2] KOTISA, Z. NF zesilovače – 3. díl Tranzistorové výkonové zesilovače. BEN – technická literatura, Praha, 2003.

[3] METZLER, B. Audio Measurement Handbook. Beaverton, Audio Presision, Inc., 1993.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 23.5.2019

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem nízkofrekvenčního koncového zesilovače ve třídě AB z diskretních součástek. Dále se zabývá doplněním o předzesilovač, sluchátkový zesilovač a napájecí zdroje. Celok je doplněn o digitální část, která zajišťuje ovládání celého zesilovače. Výsledkem teoretické části práce je celková obvodová struktura jmenovaných bloků a výsledky simulací důležitých celků. V praktické části se práce zabývá výrobou prototypu, návrhem skříně zesilovače a měřením funkčního prototypu v laboratoři. V bakalářská práce dále obsahuje konstrukční podklady pro zhotovení celého zesilovače.

## **Klíčová slova**

Koncový zesilovač, korekční předzesilovač, napájecí zdroj, mikroprocesorové řízení, sluchátkový zesilovač, nízkofrekvenční zesilovač, výkonový zesilovač, třída AB, simulace, modul ochran.

## **Abstract**

This work deals with design of low-frequency amplifier in class AB from discrete components. It also deals with adding a preamplifier, headphone amplifier and power supplies. The whole is complemented by a digital part that controls the entire amplifier. The result of the theoretical part is the overall circumferential structure of the mentioned blocks and the results of simulations of important units. In the practical part the thesis deals with the production of the prototype, the design of the amplifier case and the measurement of the functional prototype in the laboratory. The work also contains constructional data for making the whole amplifier.

## **Keywords**

Power amplifier, pre-amplifier, power supply, microcontroller, headphones amplifier, class AB, simulations, speaker protection.

## **Bibliografická citace:**

STRAŽNICKÝ, Martin. *Audio zesilovač s přepínatelnými vstupy a mikroprocesorovým řízením*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118426>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou práci na téma Audio zesilovač s přepínatelnými vstupy a mikroprocesorovým řízením jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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 práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne:

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

*Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé práce.*

V Brně dne:

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod .....	12
2	Nízkofrekvenční řetězec .....	13
2.1	Předzesilovač .....	13
2.2	Mezilehlý zesilovač .....	13
2.3	Koncový zesilovač .....	13
3	Bloková struktura zesilovače .....	15
3.1	Popis blokového řešení .....	15
4	Návrh koncového stupně .....	17
4.1	Schéma zapojení koncového stupně .....	17
4.2	Funkce .....	17
4.2.1	Funkce zesilovače .....	17
4.2.2	Funkce ochrany .....	18
4.3	Výpočty koncového stupně .....	19
4.4	Simulace .....	21
5	Návrh předzesilovače .....	23
5.1	Přepínač vstupů .....	23
5.1.1	Funkce .....	23
5.2	Předzesilovač .....	24
5.2.1	Funkce .....	24
5.2.2	Simulace .....	24
5.3	Sluchátkový zesilovač .....	26
5.3.1	Funkce .....	26
6	Mikroprocesorové řízení .....	27
6.1	Funkce .....	27
7	Zdroje .....	28
7.1	Zdroj pro koncový stupeň .....	28
7.1.1	Funkce .....	28
7.1.2	Výpočty .....	28
7.2	Zdroj pro předzesilovač .....	29
7.2.1	Funkce .....	29
7.3	Zdroj pro mikroprocesor .....	30

7.3.1	Funkce.....	30
7.3.2	Softstart.....	31
7.3.3	Funkce.....	31
8	Mechanické uspořádání.....	32
9	Měření .....	34
9.1	Měření předzesilovače.....	34
9.1.1	Měření vstupního odporu.....	34
9.1.2	Měření přeslechů.....	34
9.1.3	Měření harmonického zkreslení.....	35
9.1.4	Frekvenční charakteristika subsonického filtru .....	35
9.1.5	Frekvenční charakteristika korekcí .....	36
9.1.6	Zhodnocení výsledků měření předzesilovače .....	36
9.2	Měření koncového zesilovače .....	37
9.2.1	Měření vstupního odporu.....	37
9.2.2	Měření maximálního výstupního výkonu pro limitaci .....	37
9.2.3	Měření účinnosti .....	37
9.2.4	Výstupní odpor .....	37
9.2.5	Činitel tlumení .....	38
9.2.6	Měření rychlosti přeběhu .....	38
9.2.7	Měření harmonického zkreslení.....	38
9.2.8	Frekvenční charakteristika koncového zesilovače.....	39
9.2.9	Zhodnocení výsledků měření koncového stupně.....	39
10	Závěr.....	41



# Seznam symbolů a zkratk

## Zkratky:

SOAR	bezpečná pracovní oblast tranzistoru (Safe Operating ARea)
DPS	deska plošných spojů
SNAP-IN	technologie výroby kondenzátoru
GNDA	signálová (analogová) zem
GND	digitální zem
SMD	Surface Mount Device (součástky určené pro povrchovou montáž)
THT	Trough Hole Technology (klasické drátové součástky)
OZ	operační zesilovač
J-FET	tech. výroby tranzistoru (Junction – Field Electric Transistor)

## Symbols:

$f$	frekvence	[Hz]
$f_d$	dolní mezní frekvence	[Hz]
$f_h$	horní mezní frekvence	[Hz]
$A_u$	zesílení v bezrozměrné jednotce	[-]
$a_u$	zesílení v dB	[dB]
$I_m$	maximální amplituda proudu	[A]
$I_S$	střední hodnota proudu	[A]
$U_{cc}$	kladné napájecí napětí	[V]
$U_{ee}$	záporné napájecí napětí	[V]
$U_{sek}$	sekundární napětí na transformátoru	[V]
$U_f$	napětí na diodě v propustném směru	[V]
$P_{OUT}$	výstupní výkon zesilovače	[W]
$P_{transf}$	výkon transformátoru	[W]
$R$	odpor	[ $\Omega$ ]
$R_{JC}$	tepelný odpor na rozhraní čipu a pouzdra	[K/W]
$R_{CH}$	tepelný odpor na rozhraní pouzdra a chladiče	[K/W]
$R_H$	tepelný odpor na rozhraní chladiče a okolí	[K/W]
$\vartheta_j$	maximální teplota čipu	[ $^{\circ}$ C]
$\vartheta_o$	maximální teplota okolí	[ $^{\circ}$ C]
$\varphi$	fázový posuv	[ $^{\circ}$ ]
$\alpha$	úhel síťového napětí	[ $^{\circ}$ ]

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Nízkofrekvenční řetězec.....	13
Obrázek 2 – Blokové schéma zesilovače.....	16
Obrázek 3 – Zapojení stejnosměrné ochrany koncového stupně.....	18
Obrázek 4 – Náhradní tepelné schéma.....	20
Obrázek 5 – Modulová frekvenční přenosová charakteristika koncového stupně ...	21
Obrázek 6 – Funkce stejnosměrné ochrany koncového stupně .....	22
Obrázek 7 – Výkonové charakteristiky koncového stupně .....	22
Obrázek 8 – Zapojení přepínače vstupů .....	23
Obrázek 9 – Modulová a fázová přenosová frekvenční charakteristika předzesilovače.....	25
Obrázek 10 – Charakteristika korekcí a subsonického filtru .....	25
Obrázek 11 – Sluchátkový zesilovač .....	26
Obrázek 12 – Zdroj koncového stupně .....	28
Obrázek 13 – Zdroj předzesilovače .....	29
Obrázek 14 – Zdroj mikroprocesoru.....	30
Obrázek 15 – Schéma softstartu .....	31
Obrázek 16 – Vnitřní uspořádání modulů.....	32
Obrázek 17 – Rozmístění děr na předním panelu .....	33
Obrázek 18 – Rozmístění děr na zadním panelu .....	33
Obrázek 19 – Modulová frekvenční charakteristika subsonického filtru .....	35
Obrázek 20 – Modulová frekvenční charakteristika korekcí .....	36
Obrázek 21 – Modulová frekvenční charakteristika koncového zesilovače.....	39

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Přeslechy předzesilovače .....	34
Tabulka 2 – Harmonické zkreslení předzesilovače .....	35
Tabulka 3 – Rychlost přeběhu koncového stupně .....	38
Tabulka 4 – Harmonické zkreslení koncového stupně .....	38

# 1 Úvod

Tato práce je zaměřena na kompletní návrh nízkofrekvenčního zesilovače. Nízkofrekvenčním zesilovačem se rozumí zesilovač, který pracuje v oblasti kmitočtů, kde je lidské ucho nejcitlivější tj. od 20 Hz do 20 kHz. Existují dva základní druhy zesilovačů a to napěťové nebo proudové. Napěťové zesilovače mají za úkol dostatečně zesílit úroveň signálu. Napěťově zesílený signál přichází na vstup proudového zesilovače, kde se dále výkonově zesílí. Tímto způsobem pracuje koncový stupeň nízkofrekvenčního zesilovače.

V teoretické části se práce věnuje návrhem blokového schématu, kde byl důraz kladen zejména na kombinaci nízkofrekvenční a digitální části. Při návrhu jednotlivých celků se vychází z blokové struktury. Obvodová struktura je navržena tak, aby při rozumné ceně měl zesilovač dobré parametry.

Koncový zesilovač byl nasimulován v programu PSpice, kde byly zjištěny jeho vlastnosti, které jsou důležité pro výběr tranzistorů a kompenzačních prvků.

Druhým navrhovaným celkem je nízkofrekvenční předzesilovač, který byl rovněž nasimulován ve stejném programu. Jelikož je tento blok převzat z [1],[2], nebyly v něm provedeny žádné zásadní úpravy. Součástí tohoto celku je sluchátkový zesilovač, který dále zvyšuje komfort při používání.

Důležitým prvkem je napěťový zdroj. V koncovém zesilovači této třídy, tedy AB, bývají zpravidla použity nestabilizované zdroje. Z tohoto důvodu musí být naddimenzovány, protože jejich nedostatečný výkon má za následek celkové zhoršení parametrů zesilovače.

V dnešní době není problém do zesilovače integrovat i digitální část. Tyto prvky zvyšují uživatelský komfort a zajišťují také ochranu zesilovače.

## 2 Nízkofrekvenční řetězec

Jelikož není možné signál zesílit pouze v jednom stupni, musí se zesilovač skládat z několika bloků. Tyto bloky tvoří nízkofrekvenční řetězec, viz obrázek 1.



Obrázek 1 – Nízkofrekvenční řetězec

### 2.1 Předzesilovač

Předzesilovač se nachází na vstupu do zesilovače. Jeho úkolem je přizpůsobit úroveň signálů z jednotlivých zdrojů, které se mohou výrazně lišit, na úroveň potřebnou pro další blok. Je důležité, aby tento blok příliš nezatěžoval předchozí obvody. Musí mít velký vstupní odpor a pro správnou funkci je třeba, aby měl malý výstupní odpor a poskytl dostatečný proud.

Důležitou vlastností je především velké napěťové zesílení. Jelikož se pracuje s malými napětími, je nutné, aby byl předzesilovač odolný vůči rušení. Protože se jedná o první blok celého zesilovače, závisí především na něm úroveň šumu. Pokud nebude nízkošumový, šum se bude v dalších stupních zesilovat a zesilovač nebude mít dobré parametry.

### 2.2 Mezilehlý zesilovač

Mezilehlý zesilovač je druhým blokem. Jedná se především o korekční obvody, které tvarují výslednou přenosovou charakteristiku potlačením nebo zdůrazněním jednotlivých spekter. Dále tento blok obsahuje regulátor hlasitosti a potenciometr vyvážení hlasitosti. Regulátor hlasitosti může být s fyziologickou regulací hlasitosti. Tato využívá vlastnosti lidského ucha tak, že zesiluje nízké a vysoké kmitočty, na které je lidské ucho méně citlivé a potlačuje frekvence okolo 1 kHz, kde je lidské ucho nejcitlivější. Frekvence se poté jeví stejně hlasitě a zvuk je subjektivně lepší.

### 2.3 Koncový zesilovač

Koncový zesilovač je posledním blokem celého zesilovače. Tento blok má za úkol výkonově zesílit signál. Obsahuje tedy jak proudový, tak napěťový zesilovač. V moderních konstrukcích tento blok připomíná vnitřní zapojení operačního zesilovače.

Na vstupu se nachází diferenční zesilovač, obvod pro nastavení konstantního proudu a u některých zapojení také aktivní zátěž. Je důležité, aby tranzistory byly párované a měly stejnou teplotu. Pokud toto není dodrženo, bude zesilovač nestabilní a nebude fungovat správně.

Signál dále vstupuje do rozkmitového stupně. Jedná se o napěťový zesilovač opět s proudovým zdrojem nebo v jednodušších zapojeních pouze s odporem.

Jeho úkolem je zesílit napěťově signál na co největší úroveň, jelikož další bloky jsou proudově zesilovače a zde bude úroveň již pouze klesat (i když bude růst výkonové zesílení).

Posledními podbloky jsou budiče výkonových tranzistorů, které mají za úkol signál proudově zesílit na dostatečnou úroveň pro koncový stupeň. V koncovém stupni se signál zesílí proudově, a protože je signál již napěťově zesílen, má to za následek výkonové zesílení. Tento blok dále obsahuje obvod pro nastavení klidového proudu (pokud to třída zesilovače vyžaduje) a může dále obsahovat obvod na omezení výstupního proudu.

Zavedením záporné zpětné vazby z výstupu zesilovače na jeden vstup diferenciálního zesilovače pomocí odporového děliče, se nastavuje zesílení celého celku. Záporná zpětná vazba sice zmenšuje zesílení, ale rozšiřuje přenosovou charakteristiku a zmenšuje zkreslení zesilovače.

V koncovém stupni se nachází také kompenzační kondenzátory, které omezují vliv parazitních kapacit a zmenšují zesílení na vysokých frekvencích a tím zmenšují riziko vzniku kladné zpětné vazby. Ta je nebezpečná hlavně z důvodu samovolného kmitání zesilovače, což má za následek kromě zhoršení parametrů také možnou destrukci některého z tranzistorů.

## 3 Bloková struktura zesilovače

V této kapitole se práce věnuje popisu blokové struktury uvažovaného zesilovače.

### 3.1 Popis blokového řešení

Celý zesilovač se skládá z několika samostatných funkčních celků, jak je ukázáno na obrázku 2. Prvním z nich je koncový zesilovač. Tento celek obsahuje rovněž ochranu proti stejnosměrnému napětí na výstupu zesilovače, které je nebezpečné pro připojenou reprosoustavu. Relé, které je ovládáno touto ochranou, plní dále funkci zpožděného sepnutí. Tento obvod má za úkol připojit reprosoustavu až poté, co se nabijí filtrační kondenzátory zdroje a až se ustálí pracovní body v celém zesilovači. Toto zpoždění zajišťuje mikroprocesor. Obvodová struktura zajistí, že přednost při vypnutí nebo sepnutí relé má stejnosměrná ochrana.

Dalším blokem je předzesilovač. Tento blok je fyzicky na jedné desce plošných spojů společně se sluchátkovým zesilovačem a s přepínačem vstupů. Zesilovač obsahuje 6 vstupů. Čtyři ze vstupů mají citlivost  $U = 250$  mV a zbylé dva mají sníženou citlivost na  $U = 700$  mV.

Zapojení dále pokračuje subsonickým filtrem, který má mezní kmitočet  $f = 19,5$  Hz. Následuje Baxandalův tónový korektor, který dovolí ovládat výšky a basy. Další blok je invertující zesilovač, který zajistí fázový posuv  $\varphi = 180^\circ$  potřebný k dorovnání fáze na  $\varphi = 0^\circ$ , neboť korektor otáčí také fázi o  $\varphi = 180^\circ$ . Následuje relé ovládané přes procesor z čelního panelu. Toto relé přepíná výstup předzesilovače na sluchátkový zesilovač nebo na koncový stupeň. Sluchátkový zesilovač je použit v katalogovém zapojení – jedná se o zesilovač se zesílením 15. Skládá se ze dvou obvodů a to z neinvertujícího zesilovače a výstupního bufferu.

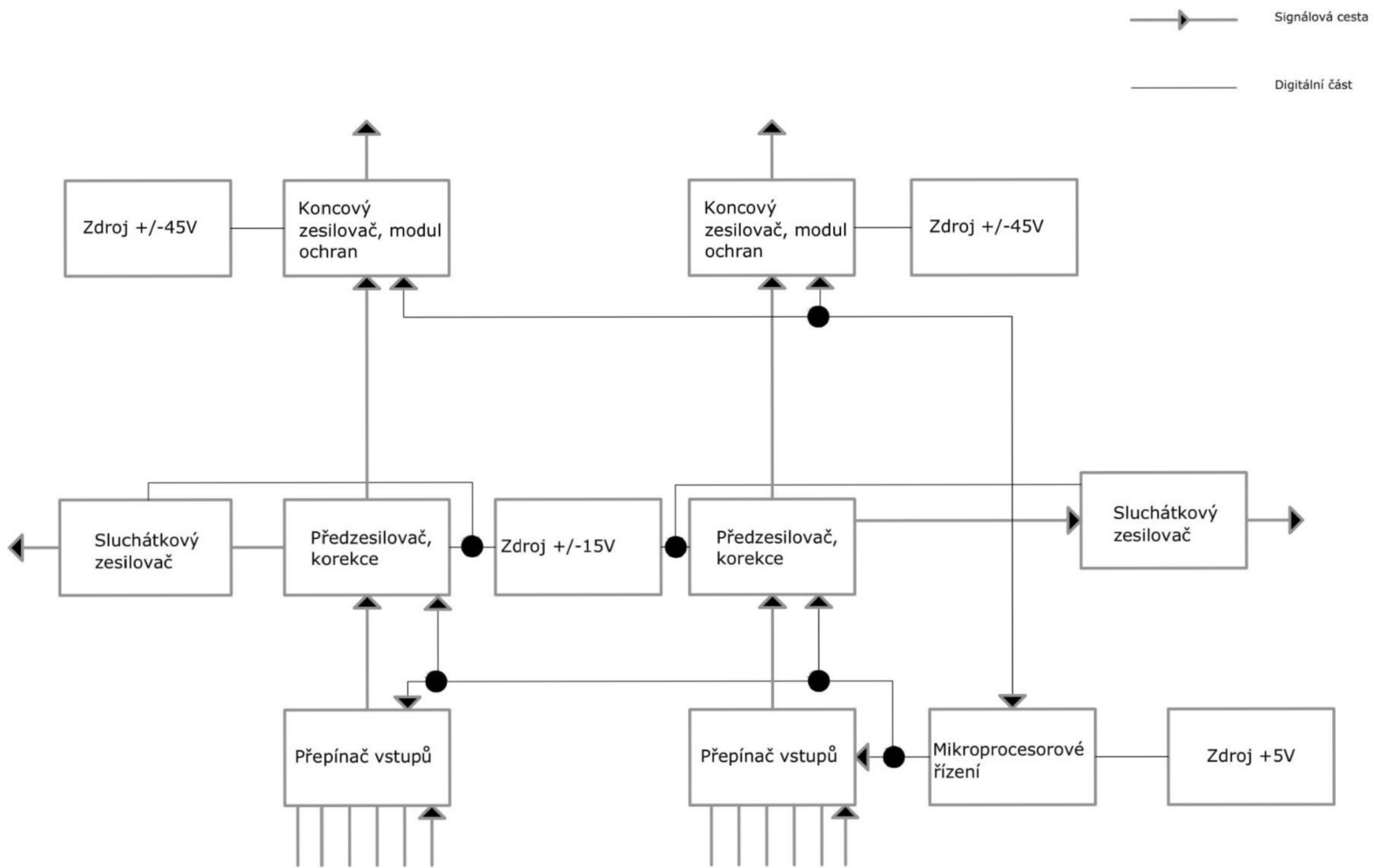
Dalším již pomocným blokem je mikroprocesorové řízení. Toto je navrženo na použití procesoru ATMEGA16. Procesor zajišťuje již zmiňované zpožděné sepnutí, dále zajišťuje spínání vstupů, toho je docíleno pomocí obvodu 4028, což je dekodér 1 z 10.

Toto řešení zapojení sice obsahuje dva kusy obvodu (jeden na spínání relé a druhý na rozsvěcení příslušné LED diody na předním panelu), ale tímto řešením se ušetřily další dva vodiče. Toto řešení by vyniklo hlavně při ještě větším počtu vstupů. Volba příslušného vstupu probíhá pomocí otočného dekodéru.

Mikroprocesor dále zajišťuje sepnutí softstartu pro zdroj koncového zesilovače a je zde také rezerva v podobě komunikace I2C a optoelektronicky oddělený vývod pro sepnutí dalších spotřebičů. Konektor pro toto zapojení bude vyveden na zadní panel.

Posledním z bloků jsou zdroje. Zesilovač obsahuje celkem čtyři zdroje. Dva napájejí koncové zesilovače a mají symetrické napětí  $U = 45$  V. Dále je zde symetrický zdroj  $U = 15$  V, který zajišťuje napájení předzesilovače a také sluchátkového zesilovače. Poslední zdroj je na napětí  $U = 5$  V pro mikroprocesor a napájení všech relé, které jsou v zesilovači obsaženy. Tento zdroj má zcela oddělenou zem od ostatních zdrojů. Tím je docíleno, že zesilovač má oddělenou signálovou a digitální zem, přes kterou by se mohlo šířit rušení. Spojení mezi bloky je tedy řešeno galvanickým oddělením optočlenem.

Obrázek 2 – Blokové schéma zesilovače





## 4 Návrh koncového stupně

V této kapitole se bude práce věnovat popisu a návrhu koncového zesilovače.

### 4.1 Schéma zapojení koncového stupně

Původní schéma zapojení pochází ze zesilovače AZK051. Toto schéma bylo přepracováno v pramenu [3] zvýšením proudu, který je nastaven proudovými zdroji a který teče přes tranzistory diferenciálního a rozkmitového stupně. Dále byly použity kompenzační metody a vyměněny koncové a budící tranzistory dle poznámek uvedených v [4]. V diferenciálním stupni je dále použita aktivní zátěž dle [5].

Výsledné schéma zapojení je obsaženo v příloze č. 1. Motiv DPS je obsažen v příloze č. 3 a rozmístění součástek v příloze č. 5.

### 4.2 Funkce

#### 4.2.1 Funkce zesilovače

Na vstupu zesilovače je zařazena pásmová propust z rezistorů  $R_1$ ,  $R_2$  a z kondenzátorů  $C_1$ ,  $C_2$ . Tento filtr má za úkol zúžit pásmo kmitočtů vstupujících do zesilovače a oddělit stejnosměrnou složku. Následuje diferenciální stupeň z tranzistorů  $Q_1$ ,  $Q_5$ . Na neinvertující vstup se přivádí signál, který zesílujeme a na druhý vstup – invertující – je přivedena záporná zpětná vazba. Tranzistor  $Q_3$  zajišťuje konstantní proud diferenciální dvojici. Je nastaven předpětím báze pomocí LED diody a rezistoru  $R_6$  na hodnotu  $I_{dif} = 4$  mA. [3] Tento proud je nastaven tak, aby bylo docíleno pracovní třídy A a dobrého poměru mezi rychlostí přeběhu a šumem způsobeným vedením proudu. Tranzistory  $Q_2$ ,  $Q_4$  pracují v režimu dynamické zátěže pro tranzistory diferenciálního stupně. Rezistory  $R_4$  a  $R_8$  zvyšují vstupní odpor zapojení a spolu s rezistory  $R_3$  a  $R_7$  vyrovnávají rozdíly v tolerancích tranzistorů. Trimrem  $R_5$  lze ještě manuálně vyrovnat rozdíly a tím případnou napěťovou nesymetrii na výstupu celého zesilovače.

Signál je dále veden do rozkmitového stupně na bázi tranzistoru  $Q_6$ . Tímto stupněm je veden proud nastavený tranzistorem  $Q_7$  a odporem  $R_{13}$  na hodnotu  $I_{rozkmitový} = 10$  mA [3]. Opět se jedná o kompromis mezi ztrátovým výkonem na jedné straně a rychlostí přeběhu na druhé. Kondenzátor  $C_6$  zajišťuje zpětnou vazbu tím, že omezí zesílení na vysokých frekvencích a zesilovač je tedy stabilní. Diody  $D_1$  je desaturační dioda, která zabraňuje hluboké saturaci rozkmitového tranzistoru při příliš silném signálu a tím pádem limitaci. Jelikož se rozkmitový tranzistor dostane rychleji ze saturace, nenastává limitace po dlouhou dobu [4]. Následuje tranzistor k nastavení klidového proudu. Klidový proud se nastavuje trimrem  $R_{15}$  a tranzistor tím, že je namontován na společném chladiči společně s koncovými a budícími tranzistory, zajistí konstantní velikost proudu změnou svého napětí  $U_{BE}$ . Signál je dále veden přes tranzistory budiče ( $Q_9$ ,  $Q_{10}$ ) do koncových tranzistorů  $Q_{11}$ ,  $Q_{12}$ . Tranzistory byly vybrány tak, aby i při špičkovém proudu vyhověly oblasti SOAR. Toto řešení zvyšuje spolehlivost celého zesilovače a odpadájí tím případné problémy při párování tranzistorů do paralelních dvojic. Rezistory  $R_{20}$  a  $R_{22}$  provádějí emitorovou degradaci. Ta sice zhoršuje účinnost zesilovače, ale protože je nemožné



### 4.3 Výpočty koncového stupně

V této podkapitole budou provedeny některé výpočty výkonového koncového stupně.

Výpočet dolní mezní frekvence vstupního filtru

$$f_d = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 39 \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6}} = 1,85 \text{ Hz} \quad (4.31)$$

Výpočet horní mezní frekvence vstupního filtru

$$f_h = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1,5 \cdot 10^3 \cdot 330 \cdot 10^{-12}} = 272 \text{ kHz} \quad (4.32)$$

Výpočet napěťového zesílení

$$A_u = 1 + \left( \frac{R_{12}}{R_{10}} \right) = 1 + \left( \frac{39 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \right) = 40 \quad (4.33)$$

$$a_u = 20 \cdot \log(A_u) = 20 \cdot \log(40) = 32 \text{ dB} \quad (4.34)$$

Výpočet maximálního a středního proudu odebíraného ze zdroje

$$I_m = \frac{U_{cc}}{R_z} = \frac{45}{8} = 5,625 \text{ A} \quad (4.35)$$

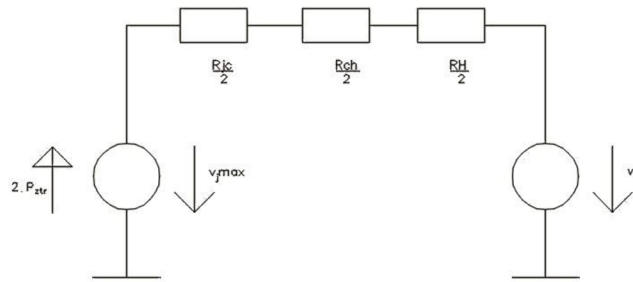
$$I_s = \frac{I_m}{\pi} = \frac{5,625}{\pi} = 1,79 \text{ A} \quad (4.36)$$

Výpočet chladiče koncových tranzistorů a můstkového usměrňovače [7]

Předpoklady:

- Slídková podložka  $R_{CH} = 0,6 \text{ K/W}$
- $R_{JC} = 0,54 \text{ K/W}$
- $\vartheta_j = 120 \text{ °C}$
- $\vartheta_o = 60 \text{ °C}$
- $U_f = 1 \text{ V}$

$$P_{ztr} = \frac{P_{konec} + P_{můstku}}{3} = \frac{P_{konec} + I_s \cdot 2 \cdot U_f}{3} = \frac{100 + 1,79 \cdot 2 \cdot 1}{3} = 35 \text{ W} \quad (4.37)$$



**Obrázek 4 – Náhradní tepelné schéma**

Výpočet potřebného odporu  $R_H$

*Pozn. Na obrázku 4 je nakresleno tepelné schéma, které je uvažováno ve výpočtech. Výpočet samotný je modifikace Kirhoffova zákona pro uzavřenou smyčku.*

$$R_H = \frac{\vartheta_{jmax} - \vartheta_o}{2 \cdot P_{ztr}} - \frac{R_{JC}}{2} - \frac{R_{CH}}{2} = \frac{120 - 60}{2 \cdot 35} - \frac{0,6}{2} - \frac{0,54}{2} = 0,287 \text{ K/W} \quad (4.38)$$

*Pozn. Ve finálním výrobku bude použit chladič s  $R_H = 0,18 \text{ K/W}$ , s rozměry 400 x 84 x 150 mm výrobce Fischer typ SK650.*

Výpočet proudu proudovým zrcadlem

Předpoklady:

- $I_{dif} = 4 \text{ mA}$
- $I_{rozkmítový} = 10 \text{ mA}$
- $U_{LED} = 2 \text{ V}$

$$R_{dif} = \frac{U_{LED} - U_{BE}}{I_{dif}} = \frac{2 - 1}{4 \cdot 10^{-3}} = 270 \Omega \quad (4.39)$$

$$R_{rozkmít} = \frac{U_{LED} - U_{BE}}{I_{rozkmít}} = \frac{(2 - 1)}{10 \cdot 10^{-3}} = 100 \Omega \quad (4.40)$$

## 4.4 Simulace

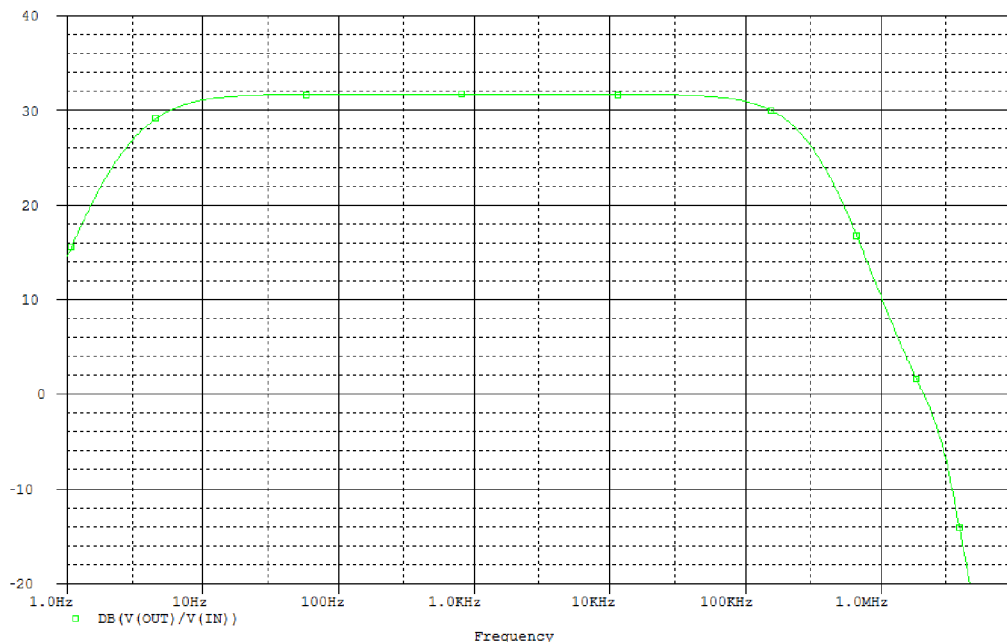
Na obrázku 5 je zobrazena modulová přenosová charakteristika koncového stupně. Z ní je patrné, že k poklesu o -3 dB dochází na kmitočtu  $f = 4$  Hz a na kmitočtu  $f = 211$  kHz. Maximální hodnota přenosu činí podle simulace  $A_{u, dB} = 31,7$  dB a od vypočtené hodnoty  $A_{u, dB} = 32$  dB se liší jen o 0,3 dB.

Pro zajímavost je odečteno i pásmo s poklesem o -1 dB, které je od  $f = 4,8$  Hz do  $f = 112$  kHz oproti maximální hodnotě přenosu.

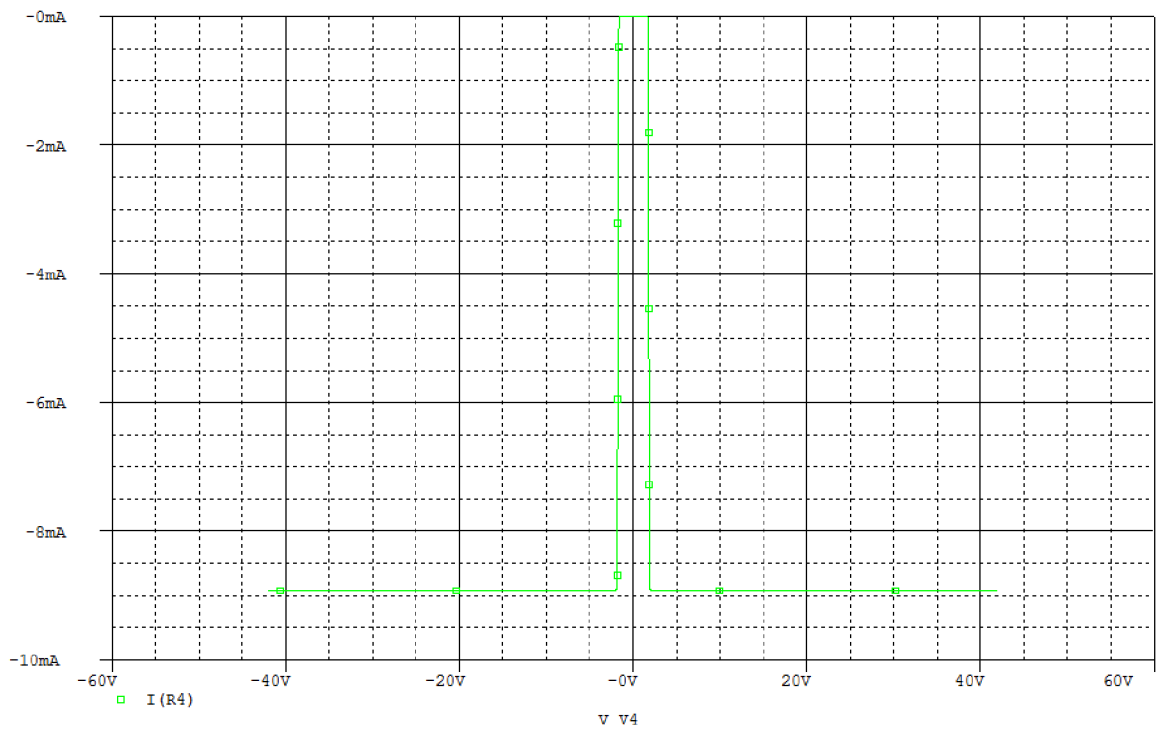
Z dalších simulací zobrazených na obrázku 7 vyplývá, že pro plné vybuzení musí být vstupní napětí o hodnotě  $U_{in} = 1$  V. Dále ze simulace plyne, že zesilovač má podat výkon asi  $P_{OUT} = 100$  W do zátěže  $R_z = 8$  ohmů. Na simulaci je zároveň zobrazen průběh ztrátového výkonu na obou komplementárních tranzistorech, který činí asi  $P_{ztr} = 45$  W v maximu.

Na obrázku 6 je zobrazena a ověřena funkce stejnosměrné ochrany. Ze simulace je patrné, že ochrana začíná plnit svou funkci (tedy odpojit výstup zesilovače) od napětí cca 2 V, což odpovídá i hodnotě udávané ve zdroji [4].

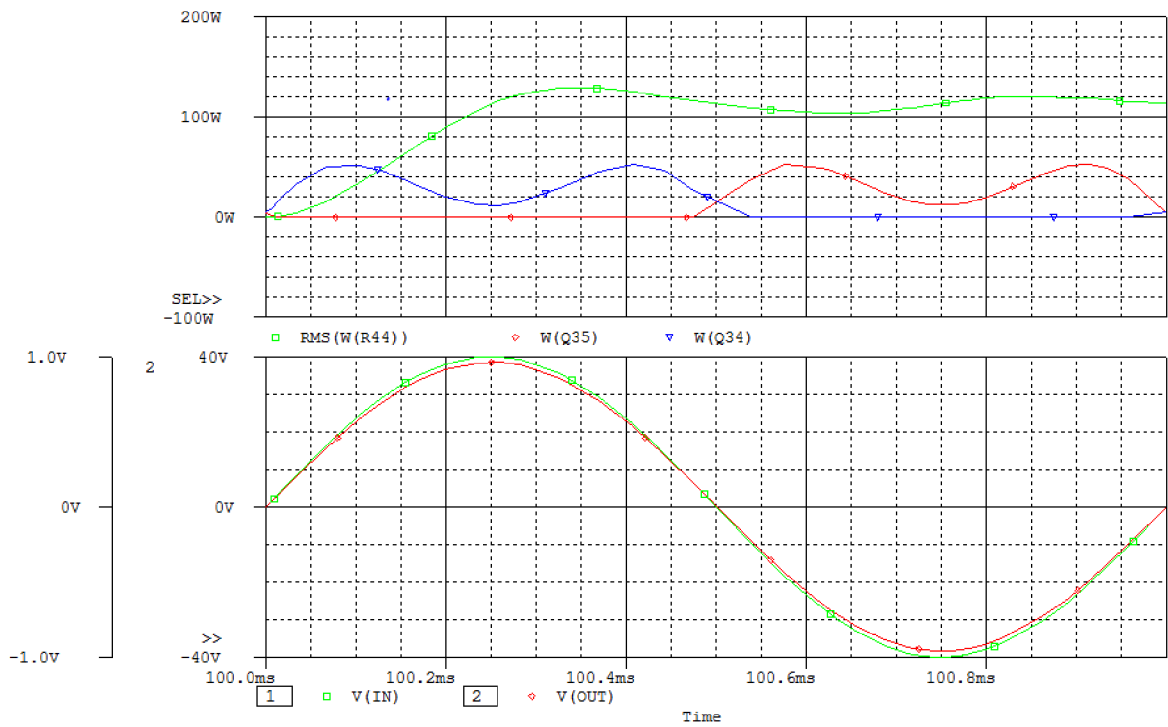
Z DC simulace plyne, že v klidovém stavu je na výstupu zesilovače stejnosměrné napětí 9 mV. Tato hodnota se blíží ideální hodnotě 0 V. V praktickém řešení bude záležet hlavně na výběru tranzistorů diferenciálního stupně a na nastavení potenciometru  $R_5$ .



**Obrázek 5 – Modulová frekvenční přenosová charakteristika koncového stupně**



Obrázek 6 – Funkce stejnosměrné ochrany koncového stupně



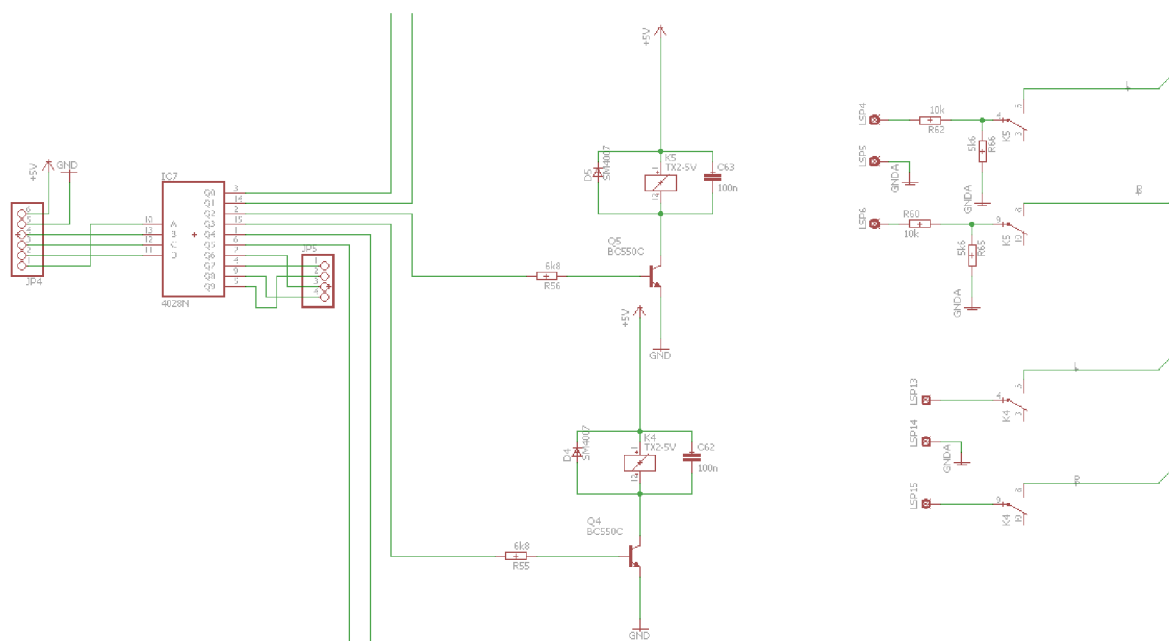
Obrázek 7 – Výkonové charakteristiky koncového stupně

## 5 Návrh předzesilovače

V této kapitole se kromě návrhu předzesilovače bude práce věnovat také zapojení sluchátkového zesilovače a přepínače vstupů.

### 5.1 Přepínač vstupů

Na obrázku 8 je zobrazeno schéma přepínače vstupů. Pro názornost jsou zobrazeny pouze dva vstupy – jeden se standardní citlivostí  $U = 250 \text{ mV}$  a druhý se sníženou citlivostí na  $U = 700 \text{ mV}$ .



Obrázek 8 – Zapojení přepínače vstupů

#### 5.1.1 Funkce

Z procesoru vstupuje logický signál do obvodu 4028. Tento obvod je převodník kódu BCD na výstup 1 z 10 – obvod tedy provede výběr jednoho ze vstupů a sepne příslušný tranzistor. Nevyužité kombinace jsou vyvedeny na konektor a slouží pro dodatečné rozšíření v případě nedostatku vstupů. Z celkem 6 kanálů mají dva sníženou citlivost pomocí odporového děliče. Rozložení je takové, že 5 konektorů bude umístěno na zadním panelu a jeden na předním panelu.

## 5.2 Předzesilovač

Schéma zapojení předzesilovače je uvedeno v příloze č. 2. V této příloze je zobrazen pouze jeden kanál předzesilovače, jelikož druhý je identický. Příloha č. 4 obsahuje motiv DPS a příloha č. 6 zobrazuje rozmístění součástek na DPS.

### 5.2.1 Funkce

Signál z voliče vstupů je dále veden do předzesilovače. Na vstupu je umístěn rezistor  $R_2$  o hodnotě 47 k $\Omega$ . Hodnota tohoto odporu je prakticky vstupním odporem celého zesilovače. Dále z důvodu snížení zatížení předcházejících obvodů a posílení proudové zatížitelnosti pro následující obvody, je na vstupu zařazen impedanční oddělovač.

Následně je signál veden do horní propusti III. řádu. Tento filtr má za úkol odfiltrovat subsonické složky tj. složky pod  $f = 20$  Hz. Mezní frekvence filtru pro pokles o 3 dB je na  $f = 19,5$  Hz. Zapojení pochází z [1], ale byla upravena hodnota odporu  $R_7$ , jelikož v daném zapojení nebyl operační zesilovač stabilní a kmítal. Dále byla oproti zdroji [1] použita pouze jedna část, neboť strmost filtru je již dostačující a činí 60 dB/dek.

Následně je signál zesílen  $A_u = 2\times$  a vstupuje na Baxandalův tónový korektor. Toto zapojení je rovněž přejato z [2]. Dále je signál veden do fyziologického ovládání hlasitosti. Toto zapojení pochází z [8]. Úprava spočívá v rozdělení kapacity kondenzátoru 6 $\mu$ 6 na celkem 3 kusy. Každý má kapacitu 2 $\mu$ 2. Důvodem je lepší využití místa na DPS, protože kondenzátory s tak velkou kapacitou se vyrábějí pouze na vyšší napětí a také nižší cena v porovnání s jedním kusem původní kapacity. Regulace hlasitosti bude osazena potenciometrem typu TP289 25 k/Y (jedná se o potenciometr s logaritmickým průběhem a odbočkou ve třetině dráhy).

Další blok je invertující zesilovač, který zajistí fázový posuv  $\varphi = 180^\circ$  potřebný k dorovnání fáze na  $\varphi = 0^\circ$ , neboť korektor otáčí také fázi o  $\varphi = 180^\circ$ , jak je patrné ze simulací. Zesílení tohoto bloku je  $A_u = 2\times$ . Ve zpětné vazbě je zařazen trimr  $R_{47}$ , který slouží k dorovnání rozdílu hlasitosti mezi jednotlivými kanály při velké toleranci součástek. Na konci celého bloku je relé ovládané mikroprocesorem, sloužící k přepnutí signálu na koncový zesilovač nebo na sluchátkový zesilovač. Všechny obvody jsou blokovány malým keramickým kondenzátorem  $C = 100$  nF a dále pro případ kolísání napájecího napětí, např. při odběru sluchátkového zesilovače, jsou v napájení elektrolytické kondenzátory  $C = 100$   $\mu$ F.

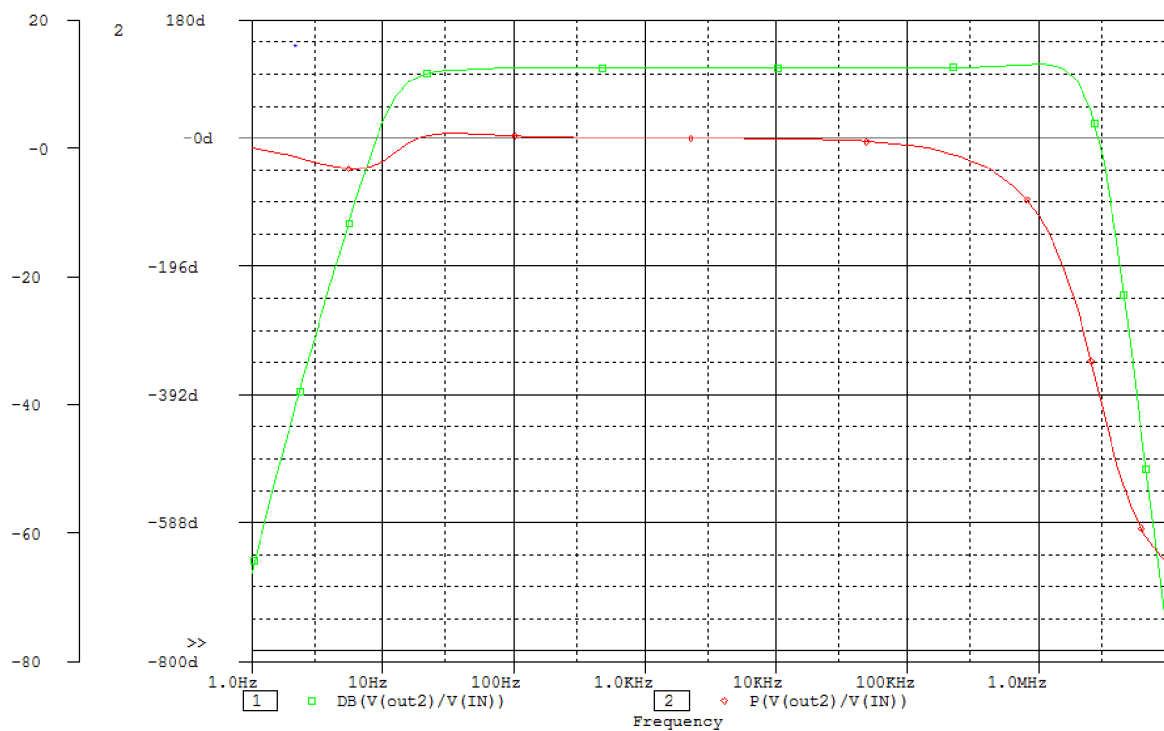
### 5.2.2 Simulace

Na obrázku 9 je zobrazena modulová a fázová frekvenční přenosová charakteristika předzesilovače. Frekvenční rozsah pro pokles o 3 dB proti maximální hodnotě přenosu činí  $f_{min} - f_{max} = 21$  Hz – 2 MHz. Tento rozsah je dostatečný pro zajištění dobré reprodukce. Tyto hodnoty platí pro napětí na výstupu přepínače  $U = 250$  mV a nastavené střední polohy všech korekcí. V simulaci není zahrnut vliv fyziologické regulace hlasitosti.

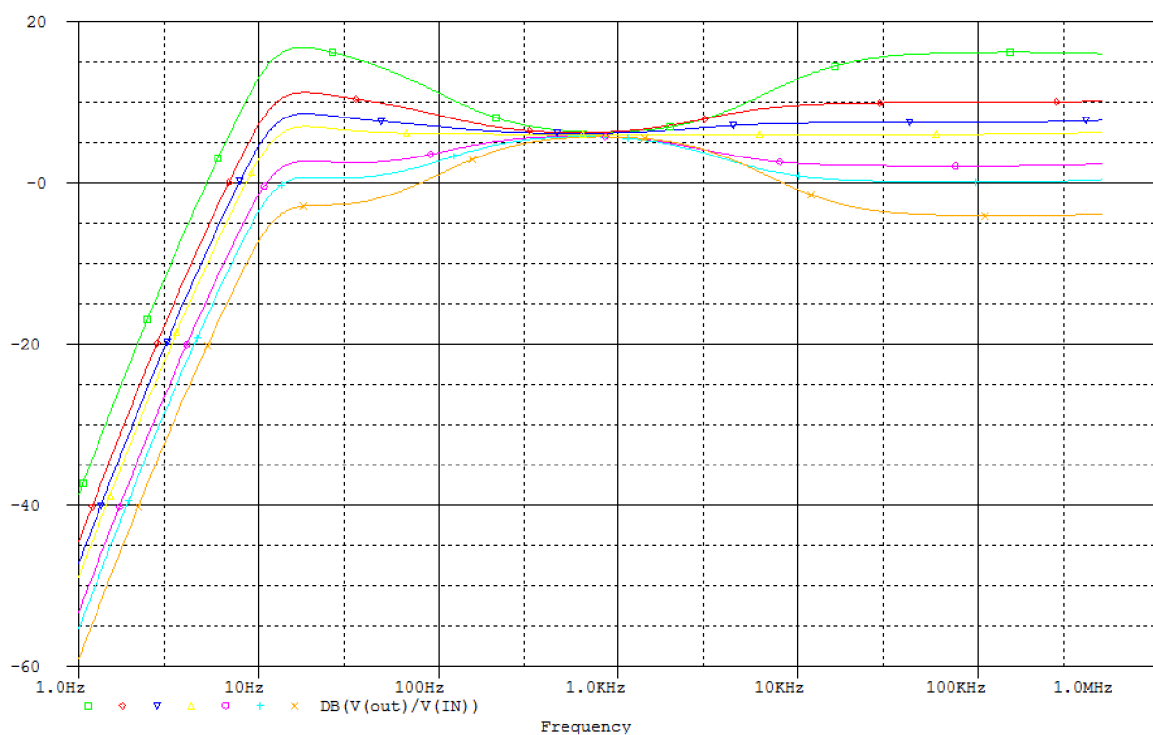
Na obrázku 10 je zobrazena parametrická simulace, při které byly rozmítány hodnoty odporu potenciometrů korekcí. V této simulaci je rovněž zahrnut vliv subsonického filtru. Maximální rozsah korekcí výšek a hloubek činí + 8 dB pro hloubky a + 10 dB pro výšky. Minimální rozsah korekcí výšek a hloubek činí - 10 dB pro hloubky a - 10 dB pro výšky.

Hodnota přenosu v nulové pozici je + 6 dB.





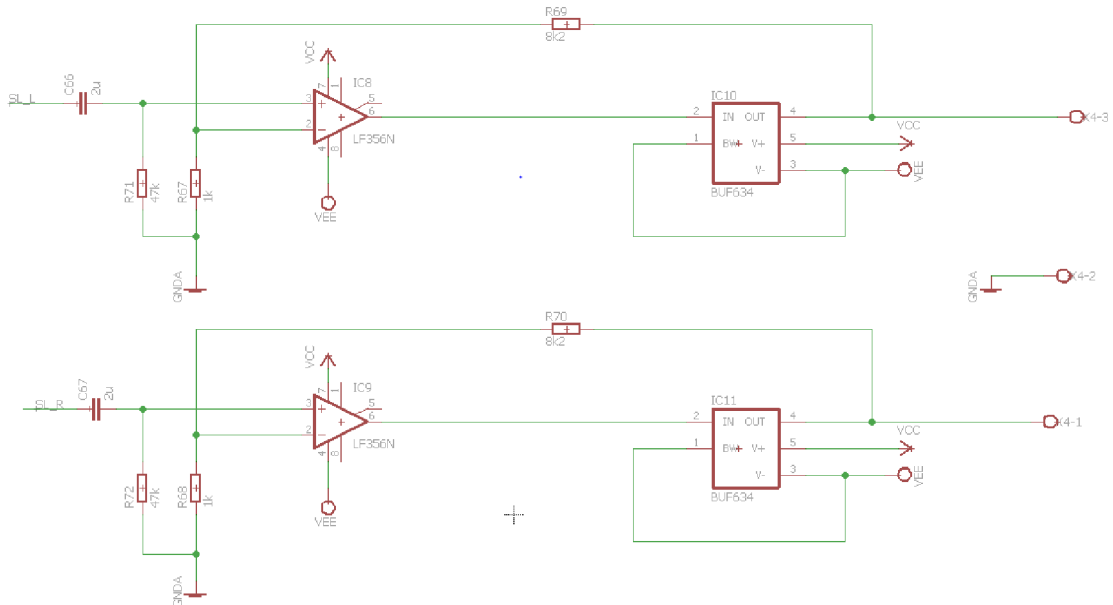
**Obrázek 9 – Modulová a fázová přenosová frekvenční charakteristika předzesilovače**



**Obrázek 10 – Charakteristika korekcí a subsonického filtru**

## 5.3 Sluchátkový zesilovač

Posledním blokem celého celku je sluchátkový zesilovač. Zapojení je převzato z katalogového listu obvodu BUF634 [9] a překresleno je na obrázku 11.



Obrázek 11 – Sluchátkový zesilovač

### 5.3.1 Funkce

Obvod BUF634 je nastaven na šířku pásma  $B = 180 \text{ kHz}$  a má výstupní proud  $I_{zkratový} = 400 \text{ mA}$ , což je dost vysoká hodnota i pro připojení sluchátek s malou impedancí. Nastavení zesílení je provedeno pomocí rezistorů  $R_{69}$ ,  $R_{67}$  a  $R_{70}$ ,  $R_{68}$  a má hodnotu asi  $15\times$ . Dále byly přidány odpory  $R_{71}$  a  $R_{72}$ , které nastavují vstupní odpor na hodnotu  $47 \text{ k}\Omega$ . I zde jsou všechny obvody blokovány malým keramickým SMD kondenzátorem a do napájení jsou vřazeny elektrolytické kondenzátory. Buffery budou použity v pouzdře TO – 220 a budou mít každý svůj chladič, aby byl zajištěn jejich dlouhodobý provoz.

## 6 Mikroprocesorové řízení

V příloze č. 7 je zobrazeno schéma zapojení a v přílohách č. 8 a č. 9 je motiv a rozmístění součástek mikroprocesorového řízení. Ovládání je zařízeno na bázi procesoru ATMEGA16. V příloze č. 15 je motiv DPS a osazovací plány pro LED indikátor vstupů a pro přepínače a volič vstupů.

### 6.1 Funkce

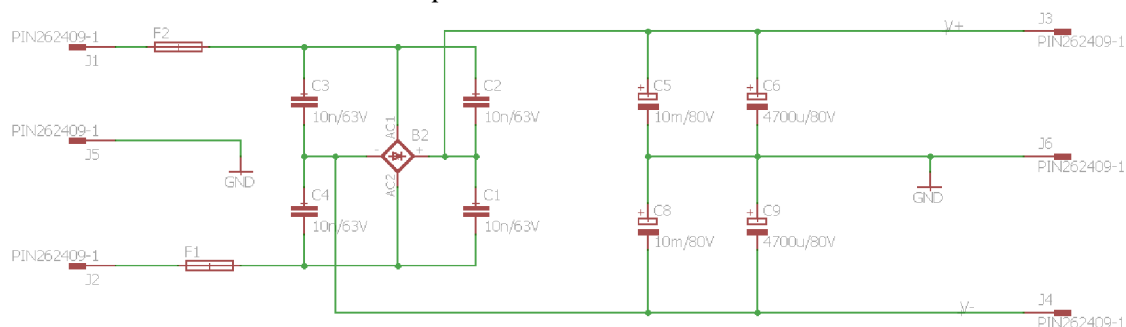
Téměř všechny funkce zesilovače jsou řízeny přes mikroprocesor. Jedinou výjimku tvoří zapojení pojistky proti stejnosměrnému napětí na výstupu. Toto řešení bylo zvoleno pro větší bezpečnost, protože v případě současné poruchy mikroprocesoru a koncového stupně by nemuselo dojít k vypnutí výstupu. Ovládání pojistky je tedy řešeno analogově a procesor pouze dostává zprávu o stavu této pojistky. Na desce s řízením se nachází také obvod 4028, který zde má podobnou funkci jako v přepínači – rozsvěcí příslušnou LED diodu zvoleného kanálu na zesilovači. Dále je zde optočlen pro vzdálené sepnutí dalších spotřebičů v případě propojení zesilovače s dalším přístrojem. Procesor se také stará o sepnutí relé softstartu zdroje pro koncové stupně. K tomuto přepnutí dojde asi po 3 sekundách, což je doba dostatečná k tomu, aby toroidní transformátory svým nárazovým proudem již nevyhodili jistič. Přepínání vstupů bude řešeno enkodérem. Mikroprocesor je blokován malými kondenzátory o hodnotě  $C_{7, 8, 10} = 100 \text{ nF}$  a dále elektrolytickým kondenzátorem  $C_9 = 100 \text{ }\mu\text{F}$ . Dále je do napájení vřazena dioda kvůli možnému kolísání napětí při sepnutí relé. Tato dioda zajistí, že se nevybijí kondenzátory umístěné u mikroprocesoru.

## 7 Zdroje

V této kapitole budou popsány všechny zdroje, které zesilovač obsahuje. Při návrhu zdrojů se vycházelo z obecných pravidel a z poznámek uvedených v [4] a [6].

### 7.1 Zdroj pro koncový stupeň

Tento zdroj je naddimenzován, jelikož je navržen na dodání trvalého špičkového výkonu. Jeho schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 12, motiv plošného spoje je v příloze č. 10 a osazení součástek v příloze č. 11.



Obrázek 12 – Zdroj koncového stupně

#### 7.1.1 Funkce

Zdroj je řešen klasickou konstrukcí a je navržen na symetrické napětí 45 V. Napájecí napětí je získáno na toroidním transformátoru. Dále je usměrněno můstkovým usměrňovačem a vyhlazeno dvojicí elektrolytických SNAP-IN kondenzátorů. Každá větev napájení obsahuje celkovou kapacitu  $C = 14,7$  mF. Zdroj dále obsahuje paralelně umístěné kondenzátory  $C_{1,2,3,4} = 10$  nF, které omezují rušení při komutaci diody. Můstkové usměrňovače jsou vpájeny do DPS a jsou přimontovány na chladič společně s koncovým zesilovačem.

#### 7.1.2 Výpočty

Dále budou uvedeny výpočty, podle kterých byl následně zdroj dimenzován.

Výpočet sekundárního napětí na transformátoru

$$U_{sek} = \frac{U_{cc}}{\sqrt{2}} + 2 \cdot U_p = \frac{45}{\sqrt{2}} + 2 \cdot 0,65 = 33 \text{ V} \quad (7.11)$$

*Pozn. Protože se transformátor s takovým napětím na daný výkon nevyrobí, bude použit transformátor se sekundárním napětím 35V. Další rovnice se věnuje právě této změně.*

$$U_{cc_{nové}} = (U_{sek_{nové}} - 2 \cdot U_p) \cdot \sqrt{2} = (35 - 2 \cdot 0,65) \cdot \sqrt{2} = 47,5 \text{ V} \quad (7.12)$$

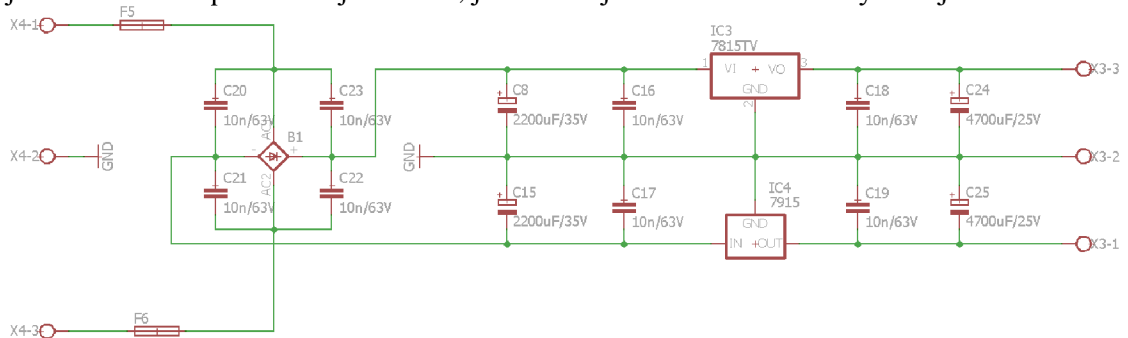
## Výpočet požadovaného výkonu transformátoru pro jeden koncový stupeň

$$P_{tranzf} = 2 \cdot I_s \cdot U_{cc_{nové}} = 2 \cdot 1,79 \cdot 47,5 = 170 \text{ W} \quad (7.13)$$

*Pozn. Aby byl zdroj dostatečně „tvrdý“ a vzhledem k výše uvedenému, bude použit transformátor s výkonem 300 VA.*

## 7.2 Zdroj pro předzesilovač

Na obrázku 13 je schéma zapojení zdroje předzesilovače. Motiv DPS a osazovací plány jsou v příloze č. 12. Tento zdroj již neobsahuje tak velkou výkonovou rezervu jako zdroj koncového stupně. Toto je možné, jelikož se jedná o stabilizovaný zdroj.



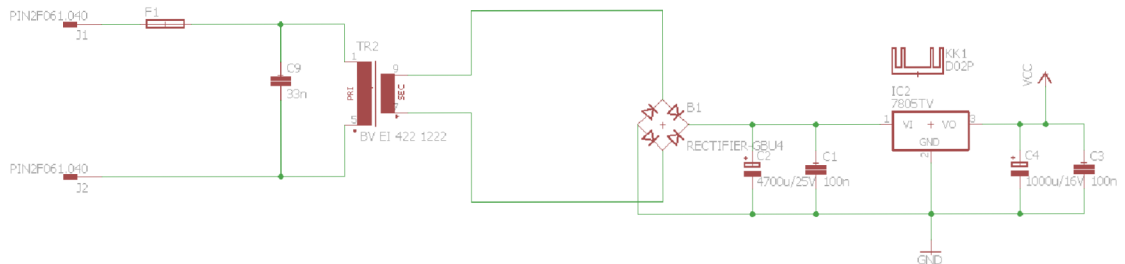
Obrázek 13 – Zdroj předzesilovače

### 7.2.1 Funkce

Zdroj má samostatný toroidní transformátor, následuje opět můstkový usměrňovač s vyhlazovacími kondenzátory. Dále je v každé větvi stabilizátor napětí na  $U = 15 \text{ V}$ , aby bylo dosaženo konstantního napětí. Tyto stabilizátory jsou dimenzovány každý na proud  $I = 2 \text{ A}$  z důvodu poskytnutí dostatečné výkonové rezervy při použití sluchátkového zesilovače. Obvody jsou blokovány z každé strany malým keramickým kondenzátorem, který zabraňuje případným oscilacím. Dále jsou zde zařazeny vyhlazovací kondenzátory, každý v jedné větvi a to o kapacitě  $C = 4700 \mu\text{F}$ . Tak velká kapacita je zde z důvodu pokrytí napěťových výchylek při zvětšeném odběru. Zdroj opět obsahuje kondenzátory  $C_{20, 21, 22, 23} = 10 \text{ nF}$ , které mají za úkol zmenšit rušení při komutaci diod.

## 7.3 Zdroj pro mikroprocesor

Tento zdroj je řešen kompletně na jedné DPS z důvodu jednoduššího zapojení, jak je ukázáno na obrázku 14, motiv DPS a osazovací plány jsou v příloze č. 13.



Obrázek 14 – Zdroj mikroprocesoru

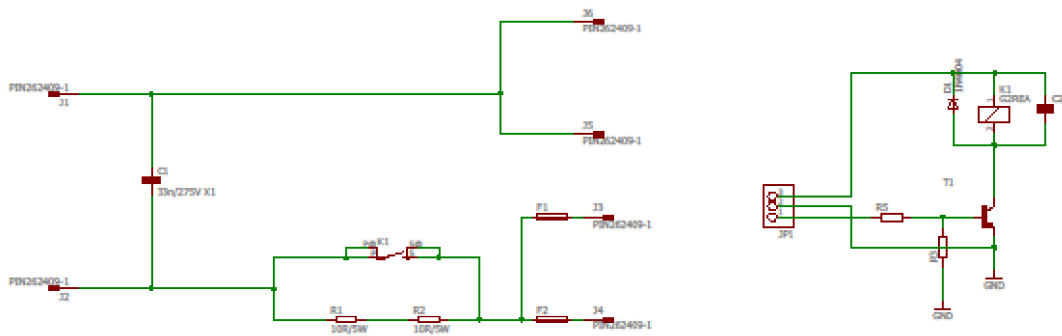
### 7.3.1 Funkce

Zdroj obsahuje transformátor EI42 na napětí  $U = 9\text{ V}$  a proud  $I = 600\text{ mA}$ . Tento byl zvolen z důvodu potřeby vyššího napětí pro lineární stabilizátor a nutného vyššího proudu pro spínání relé. Koncepce je podobná předcházejícím zapojením. Obsahuje pouze stabilizátor na  $U = 5\text{ V}$  a maximální proud  $I = 1,5\text{ A}$ . Obvod je opět blokován keramickými kondenzátory k zajištění stability.

U všech relé je umístěna dioda k omezení přepětí při vypnutí relé a kondenzátor k zachycení proudových špiček při sepnutí.

### 7.3.2 Softstart

Tento modul byl zařazen do kapitoly Zdroje, i když se nejedná o zdroj. Zapojení je s jistými obměnami použito z [4] a výsledné schéma je na obrázku 15, motiv DPS a osazovací plány jsou v příloze č. 14.



Obrázek 15 – Schéma softstartu

### 7.3.3 Funkce

Tento modul je v zesilovači použit, protože v okamžiku sepnutí dochází k proudové špičce způsobené velkými filtračními kapacitami a velkým magnetizačním proudem toroidních transformátorů. Tato špička je tím větší, čím více se síťové napětí blíží k  $\alpha = 90^\circ$  nebo  $\alpha = 270^\circ$ . Zapojení využívá sériově zapojených rezistorů na primární straně transformátorů koncových stupňů. Z důvodu lepšího rozložení výkonu jsou použity dva sériově řazené rezistory, každý s poloviční hodnotou. Jelikož má zatížení impulsní charakter, je možné tyto odpory výkonově poddimenzovat, jak je uvedeno v [4]. Zapojení tedy obsahuje dva kusy rezistorů, každý o hodnotě  $R = 10$  ohmů na výkonové zatížení  $P = 5$  W. Jak již bylo dříve zmíněno, dojde k přemostění rezistorů kontakty relé asi po třech sekundách. Tuto prodlevu zajišťuje mikroprocesor.

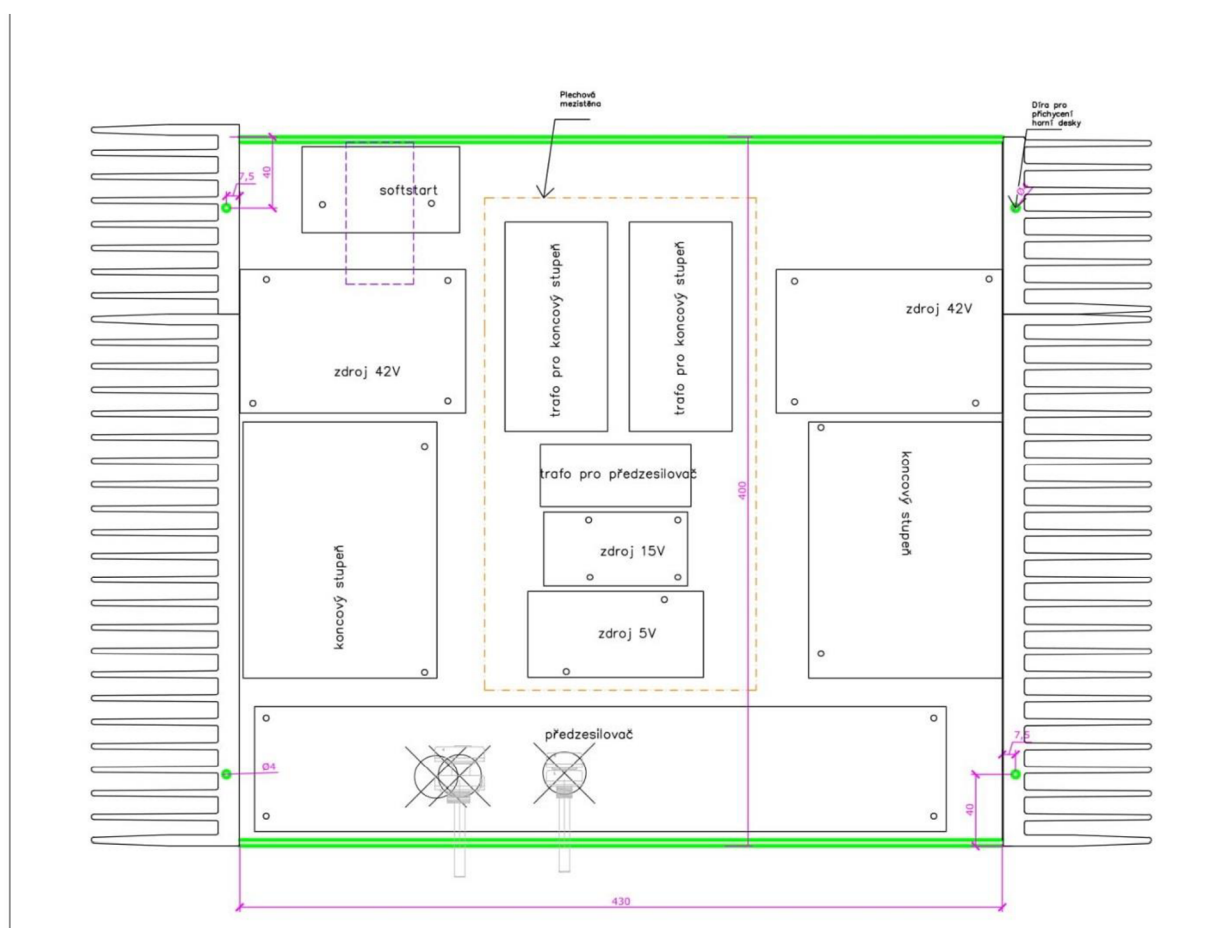
## 8 Mechanické uspořádání

Skříň zesilovače je vyrobena z laserem vypalovaného ocelového plechu tloušťky 2 mm. Výkres stříhu v měřítku 1:5 včetně míst pro ohyb je umístěn v příloze č. 24. Popisky umístěné na předním panelu jsou v příloze č. 25. Výkres „falešného dna“ a horního víka je v příloze č. 26. Vnitřní uspořádání je na obrázku 16. Skříň je v rozměru 430 x 400 mm a je tvořena ze dvou dílů. Prvním dílem je dno společně s předním a zadním panelem a malým ohybem pro přichycení chladičů. Druhým dílem je rovné horní víko se čtyřmi otvory pro uchycení do chladiče pomocí šroubů M4. Chladiče samotné nejsou součástí skříně a přesahují ji na každé straně o 80 mm.

Při rozmisťování jednotlivých modulů byl kladen důraz hlavně na délku jednotlivých vodičů a také na rozmístění součástí tak, aby se co nejméně navzájem ovlivňovaly.

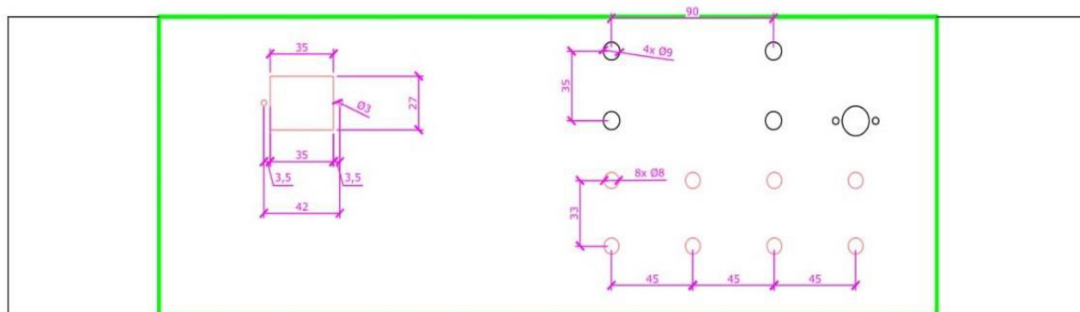
Všechny moduly budou přichyceny přes distanční sloupky šrouby M3 k „falešnému“ dnu a toto teprve bude přimontováno přes čtyři šrouby M4 ke dnu skříně, aby jednotlivé šrouby nekazily estetický dojem zesilovače. Také se tímto řešením zjednoduší montáž modulů a tažení kabelů mezi moduly.

Na obrázku 17 a 18 je uspořádání předních a zadních panelů.

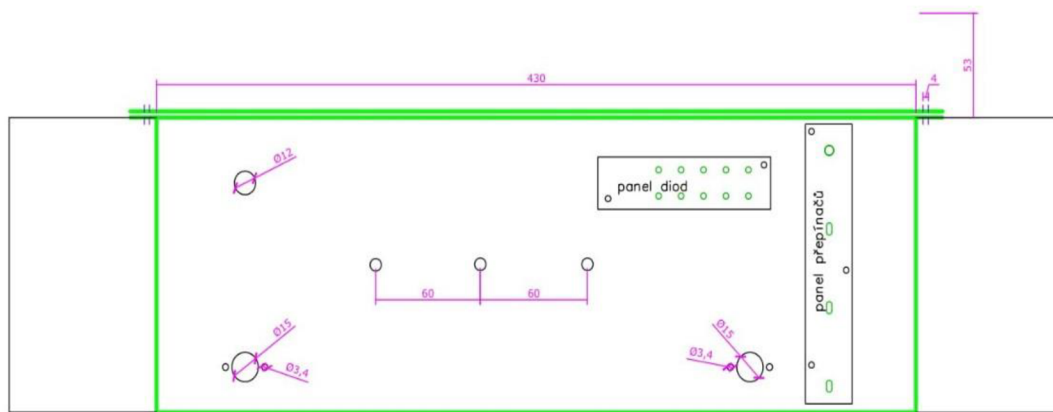


Obrázek 16 – Vnitřní uspořádání modulů, rozměry v [mm]





Obrázek 18 – Rozmístění děr na zadním panelu, rozměry v [mm]



Obrázek 17 – Rozmístění děr na předním panelu, rozměry v [mm]

## 9 Měření

Metodika měření parametrů předzesilovače a koncového zesilovače byla převzata ze zdroje [10].

### 9.1 Měření předzesilovače

Měření bylo provedeno pro jeden kanál předzesilovače osazeného operačními zesilovači LF356N, NE5534, TL082. Pro porovnání byl při měření  $THD + N$  použit na místě prvního operačního zesilovače místo TL082 typ LME49720. Předzesilovač byl buzen harmonickým signálem o efektivní hodnotě  $U_{in} = 200$  mV. Měření výstupního napětí bylo provedeno na nf. milivoltmetru se zapnutým režimem broadb. 88 kHz.

#### 9.1.1 Měření vstupního odporu

Měření bylo provedeno na kmitočtu  $f = 1$  kHz.

$$R_{VST, \text{levý}} = 45 \text{ k}\Omega$$

$$R_{VST, \text{pravý}} = 45 \text{ k}\Omega$$

#### 9.1.2 Měření přeslechů

Měření bylo provedeno pro zesílení celého předzesilovače  $A_u = 1$ . Tj. signál se nejprve dvakrát zesílil, poté čtyřikrát utlumil a poté opět dvakrát zesílil. Signál o úrovni  $U_{in} = 200$  mV byl přiveden do jednoho kanálu a měřilo se napětí ve druhém kanálu.

$f$ [Hz]	Levý do pravého		Pravý do levého	
	$U_2$ [mV]	Přeslech [dB]	$U_2$ [mV]	Přeslech [dB]
100	0,163	-61,77	0,073	-68,75
1000	0,225	-58,97	0,214	-59,41
10 000	1,23	-44,22	1,32	-43,61

Tabulka 1 – Přeslechy předzesilovače

Příklad výpočtu:

$$Přeslech = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_{in}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{0,163}{200}\right) = -61,77 \text{ dB} \quad (9.11)$$

### 9.1.3 Měření harmonického zkreslení

Měření bylo provedeno pro vstupní napětí  $U_{in} = 200$  mV na frekvenci  $f = 1$  kHz. Pro zajímavost byl v tomto měření nahrazen obvod TL082 za LME49720.

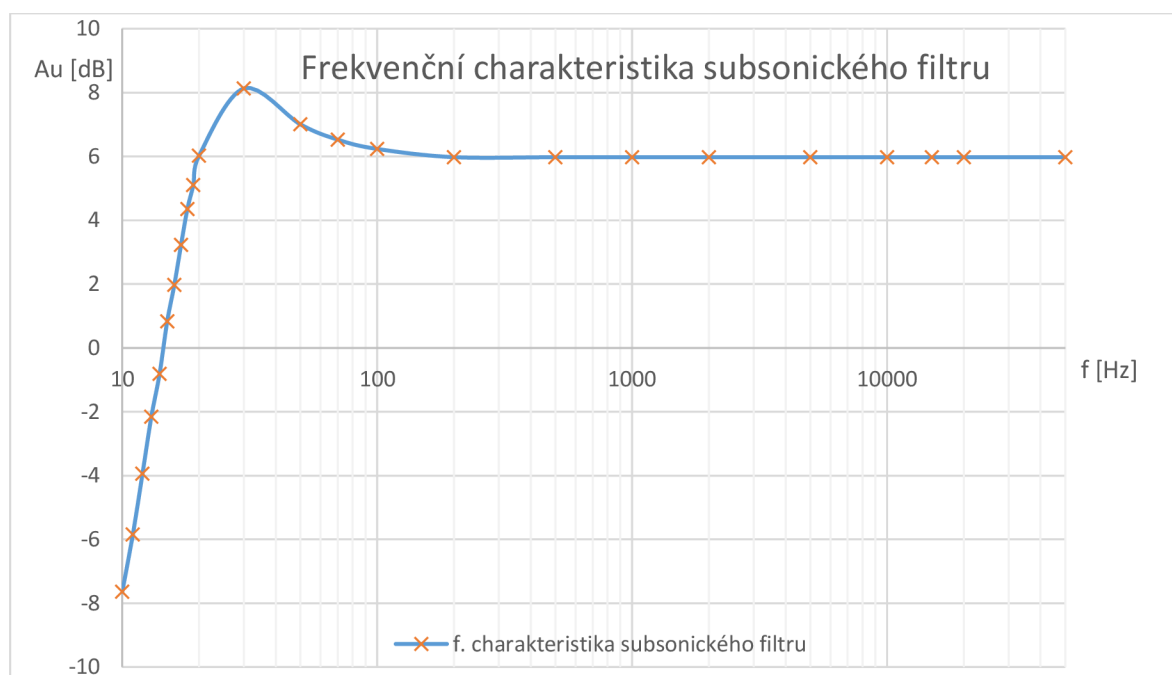
Kanál	$k_2$ [%]	$k_3$ [%]	$THD + N$ [%]
Pravý (TL082)	0,0041	0,0003	0,096
Levý (LME49720)	0,0034	0,0003	0,026

Tabulka 2 – Harmonické zkreslení předzesilovače

Při měření  $THD + N$  dohromady se sluchátkovým zesilovačem se hodnoty neměnily. Toto je dáno tím, že výstupní buffery mají daleko větší šířku pásma než předcházející obvody a tudíž už nevnášejí další zkreslení. Navíc signál má na jejich vstupech poměrně velkou úroveň, a proto se ani šumová složka neprojevuje.

### 9.1.4 Frekvenční charakteristika subsonického filtru

Měření bylo provedeno pro vstupní napětí  $U_{in} = 200$  mV. Mezní frekvence pro pokles o 3 dB proti maximální hodnotě přenosu činí  $f_d = 19$  Hz, horní mezní frekvenci se nepodařilo určit a je větší než  $f_h = 50$  kHz. Výsledný graf je uveden na obrázku 19.

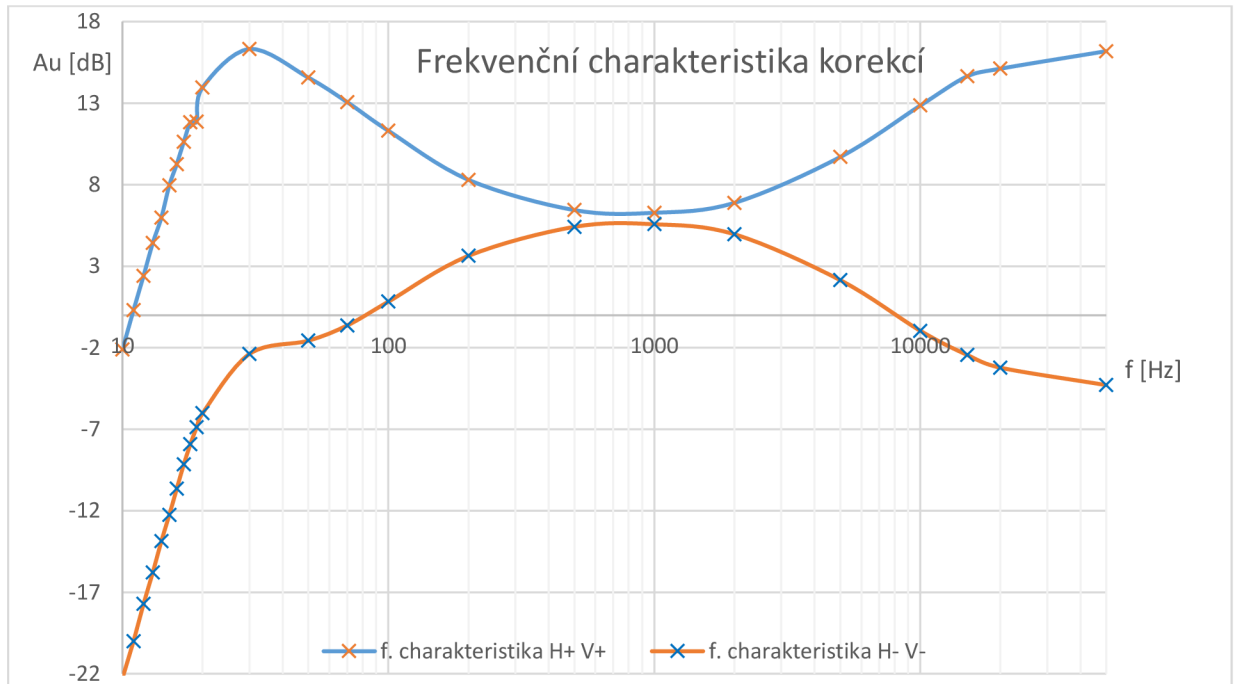


Obrázek 19 – Modulová frekvenční charakteristika subsonického filtru

### 9.1.5 Frekvenční charakteristika korekcí

Měření bylo provedeno pro vstupní napětí  $U_{in} = 200$  mV.

Hodnota přenosu v nulové pozici je  $A_{u,dB} = +5,57$  dB. Mezní frekvence pro regulaci hloubek je asi  $f_d = 150$  Hz a mezní frekvence pro regulaci výšek je asi  $f_h = 5$  kHz. Výsledný graf je uveden na obrázku 20.



Obrázek 20 – Modulová frekvenční charakteristika korekcí

### 9.1.6 Zhodnocení výsledků měření předzesilovače

Měřením byl zjištěn vstupní odpor  $R_{vst} = 45$  k $\Omega$ . Od hodnoty použité v zapojení (47 k $\Omega$ ) se liší o 2 k $\Omega$ . Rozdíl je dán tolerancí součástek a obtížným odečítáním z přípravku. Tento rozdíl je ale nepodstatný, protože naměřená hodnota je už dostatečná k tomu, aby předzesilovač nezatěžoval předchozí zdroje signálu. Zároveň je dostatečná k tomu, aby vstupem tekla dostatečný proud a tím se zamezilo zbytečnému indukovaní šumu do vstupních obvodů.

Z měření přeslechů plyne, že při zvyšování frekvence se odstup kanálů snižuje, ale i při frekvenci  $f = 10$  kHz je dostatečný pro dobrou reprodukci. V neprospěch měření zřejmě vystupuje fakt, že se signál nejprve zesílil, poté zeslabil a poté opět zesílil.

Při měření harmonického zkreslení je vidět, že zkreslení na třetí harmonické frekvenci je nižší než na druhé harmonické frekvenci. Toto je dáno dobrými parametry operačních zesilovačů a větší vliv na zkreslení signálu mají pasivní prvky tónových korekcí a fyziologické regulace hlasitosti. Největším překvapením je náhrada prvního OZ za LME49720 a s tím spojený pokles  $THD + N$ . Pokles je způsoben tím, že LME49720 je bipolární operační zesilovač oproti TL082, který je J-FETový OZ a tudíž do vstupu TL082 teče pouze malý proud, daný jeho vysokým vstupním odporem, na který se indukují rušení a šum a tím dále zhoršuje  $N$  složku při měření.

## 9.2 Měření koncového zesilovače

Měření bylo provedeno pro jeden kanál koncového zesilovače, jelikož druhý kanál je identický. Měření výstupního napětí bylo provedeno na nf. milivoltmetru se zapnutým režimem broadb. 88kHz. Zesilovač byl před měřením ponechán zapnutý, aby se teplotně stabilizovaly pracovní body všech tranzistorů

### 9.2.1 Měření vstupního odporu

Měření bylo provedeno na kmitočtu  $f = 1$  kHz.

$$R_{vst} = 40 \text{ k}\Omega$$

### 9.2.2 Měření maximálního výstupního výkonu pro limitaci

Měření probíhalo tak, že se na generátoru zvyšovalo napětí  $U_1$  a na osciloskopu se sledovaly změny výstupního napětí. Při efektivním napětí  $U_1 = 750$  mV, bylo patrné, že se zesílené napětí  $U_2$  začíná ořezávat a zesilovač se dostává do limitace. Tento jev nastal při výstupním efektivním napětí  $U_2 = 28,5$  V.

Výstupní výkon se poté spočítá následovně:

$$P_{max} = \frac{U_2^2}{R_z} = \frac{28,5^2}{8} = 101,5 \text{ W} \quad (9.21)$$

### 9.2.3 Měření účinnosti

Toto měření navazuje na předchozí měření. Při maximálním výstupním výkonu byl změřen proud ze zdroje  $I = 1,58$  A a napětí zdroje  $U = 2 \times 44$  V.

Výsledná účinnost se spočítá následovně:

$$\eta = \frac{P_{max}}{U \cdot I} = \frac{101,5}{1,58 \cdot 2 \cdot 44} = 0,73 \Rightarrow 73 \% \quad (9.22)$$

### 9.2.4 Výstupní odpor

Měření bylo opět provedeno na kmitočtu  $f = 1$  kHz a pro zátěž  $R_z = 8 \Omega$ .

Při zatíženém zesilovači bylo na zátěži napětí  $U_2 = 7,46$  V a po odpojení zátěže bylo změřeno napětí  $U_{20} = 7,61$  V.

Výsledný výstupní odpor se spočítá následovně:

$$R_{výst} = R_z \cdot \frac{U_{20} - U_2}{U_2} = 8 \cdot \frac{7,61 - 7,46}{7,46} = 0,16 \Omega \quad (9.23)$$

## 9.2.5 Činitel tlumení

Výpočet činitele tlumení vychází z předchozího měření.

$$D = \frac{R_z}{R_{výst}} = \frac{8}{0,16} = 50 \quad (9.24)$$

## 9.2.6 Měření rychlosti přeběhu

Vstupní napětí harmonického průběhu bylo nastaveno na  $U_I = 700$  mV, tedy těsně pod limitaci. Poté byl přepnut tvar signálu na obdélníkový průběh se střídou 1:1, frekvencí 1 kHz a stejným napětím a byla sledována reakce na výstupu zesilovače.

Byly změřeny hodnoty  $\Delta U$  a  $\Delta t$  pro sestupnou a náběžnou hranu obdélníkového signálu.

	<i>Náběžná hrana</i>	<i>Sestupná hrana</i>
$\Delta U$ [V]	43,095	41,98
$\Delta t$ [ $\mu$ s]	1,69	1,56
$SR$ [V/ $\mu$ s]	25,5	26,91

**Tabulka 3 – Rychlost přeběhu koncového stupně**

Příklad výpočtu:

$$SR_{náběžná} = \frac{\Delta U_{náběžná}}{\Delta t_{náběžná}} = \frac{43,095}{1,69} = 25,5 \text{ V}/\mu\text{s} \quad (9.25)$$

## 9.2.7 Měření harmonického zkreslení

Měření bylo provedeno na frekvenci  $f = 1$  kHz a jmenovitou zátěž.

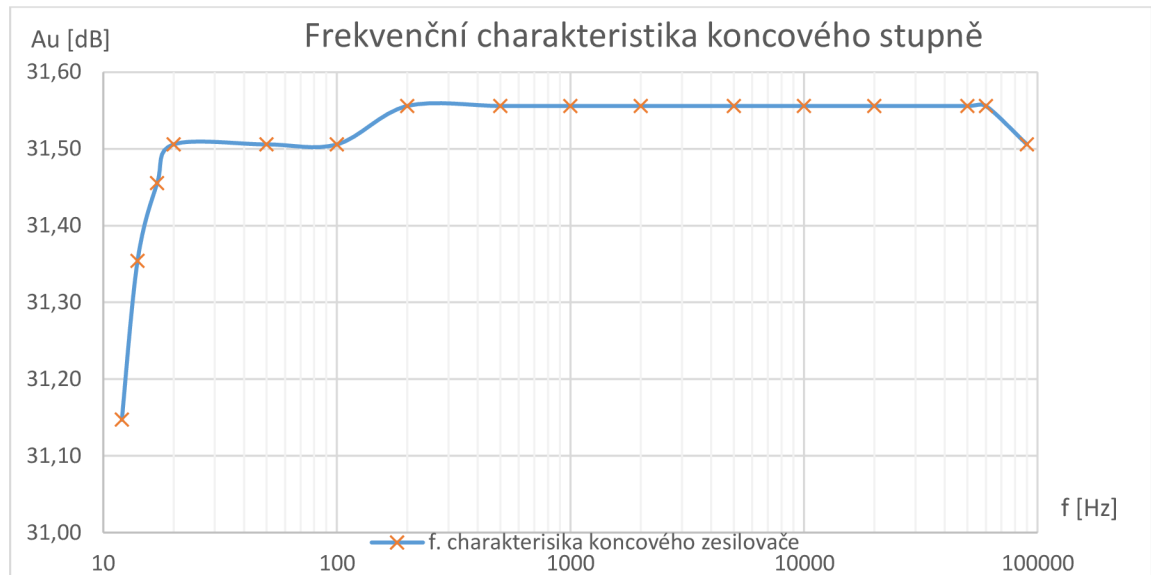
$U_I$ [mV]	$P$ [W]	$k_2$ [%]	$k_3$ [%]	$THD + N$ [%]
230	20	0,041	0,0019	0,048
460	40	0,042	0,0004	0,048
700	100	0,043	0,0075	0,049

**Tabulka 4 – Harmonické zkreslení koncového stupně**

## 9.2.8 Frekvenční charakteristika koncového zesilovače

Z důvodu použití zátěže 40 W, bylo toto měření provedeno právě pro tento výkon.

Z měření je patrné, že k poklesu o 3 dB oproti maximální hodnotě přenosu dochází pod  $f_d = 12$  Hz a horní mezní frekvence je vyšší než  $f_h = 90$  kHz. Výsledný graf je uveden na obrázku 21.



Obrázek 21 – Modulová frekvenční charakteristika koncového zesilovače

Výpočet výstupního výkonu:

$$U_2 = \sqrt{P \cdot R_z} = \sqrt{40 \cdot 8} = 17,88 \text{ V} \quad (9.26)$$

Výpočet vstupního napětí:

$$U_1 = \frac{U_2}{A_u} = \frac{17,88}{40} = 0,447 \text{ V} \quad (9.27)$$

Při měření mělo vstupní napětí hodnotu  $U_1 = 460$  mV z důvodu odchylek.

## 9.2.9 Zhodnocení výsledků měření koncového stupně

Měřením byl zjištěn vstupní odpor  $R_{vst} = 40$  k $\Omega$ , což je dostatečná hodnota pro malé zatěžování předchozích obvodů předzesilovače.

Výstupní měřený výkon byl asi  $P_{OUT} = 100$  W do zátěže  $R_z = 8$   $\Omega$ . Při tomto výkonu měl zesilovač účinnost 73 %. Při porovnání s teoretickou hodnotou pro třídu AB, která je 78,5 % dle [11], lze zesilovač hodnotit jako ekonomický. Takto dobrá účinnost byla dosažena malým klidovým proudem, který teče přes koncové tranzistory a který má hodnotu  $I_{klidový} = 20$  mA. Dále by hodnota účinnosti šla zlepšit snížením proudu, který teče přes rozkmitový a diferenciální stupeň. Poměrně malý klidový proud, který teče

koncovými tranzistory, může být nastaven díky použitým koncovým tranzistorům, které jsou i v oblasti malých proudů lineární.

Výstupní odpor měl hodnotu  $R_{vyst} = 0,16 \Omega$ . Tato hodnota je dána především použitými degradačními odpory v emitorech koncových tranzistorů. Při této hodnotě vyšel činitel tlumení  $D = 50$ , což je hodnota už dostatečná k tomu, aby zesilovač byl schopen tlumit samovolný pohyb membrány reproduktoru [4].

Z měření rychlosti přeběhu plyne, že koncový stupeň má pro těsně limitní výkon rychlost přeběhu asi  $SR = 26 \text{ V}/\mu\text{s}$ . Tato hodnota je dobrá a souvisí především s mezním kmitočtem použitých koncových tranzistorů. Dále by šla ještě vylepšit použitím jiného tranzistoru s vyšší mezní frekvencí v rozkmitovém stupni zesilovače.

Z měření  $THD + N$  a zkreslení na druhé a třetí harmonické frekvenci plyne, že zesilovač nemá příliš velké zkreslení na lichých harmonických frekvencích, tedy na těch, na které je lidské ucho více citlivé [4]. Naopak má vyšší zkreslení na sudých harmonických frekvencích. Výsledek  $THD + N$  je tedy dán převážně sudými harmonickými frekvencemi. Zvýšení  $THD + N$  při výstupním výkonu  $P_{OUT} = 100 \text{ W}$  je dáno tím, že zesilovač se již chvíli nacházel v limitaci a ořezával sinusový průběh.

Při měření frekvenční charakteristiky se nepodařilo určit ani jeden mezní kmitočet pro pokles o 3 dB oproti maximální hodnotě přenosu. Hodnota přenosu činila  $A_{u,dB} = 31,56 \text{ dB}$  a je v pásmu od 100 Hz do 90 kHz konstantní. Proti teoreticky uvažované hodnotě zesílení  $A_{u,dB} = 32 \text{ dB}$  se lišila pouze o 0,44 dB. Tento rozdíl je zanedbatelný a je dán tolerancí součástek zpětné vazby.

Z porovnání naměřených hodnot a hodnot vypočítaných v kapitole 4.3 plyne, že proud, který teče rozkmitovým stupněm se od vypočítané hodnoty  $I_{rozkmity} = 10 \text{ mA}$  liší o 0,84 mA. Proud, který teče diferenciálním stupněm je  $I_{dif} = 4,05 \text{ mA}$  a od vypočítané hodnoty 4 mA se liší o 50  $\mu\text{A}$ .



## 10 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi návrhu nízkofrekvenčního zesilovače. Při návrhu koncového stupně jsem vycházel z ověřených koncepcí, ze kterých jsem vybral celky, které mi připadaly důležité. Finální zapojení vzniklo spojením těchto celků a výsledků simulací.

Návrh předzesilovače jsem převzal a provedl pouze dílčí změny a ověření vlastností simulacemi, jelikož tyto bloky plně vyhovovaly mým požadavkům.

Návrh jsem doplnil vlastním řešením digitální části, která zajišťuje chod zesilovače. Poslední bloky, které tato práce obsahuje, jsou napájecí zdroje. Při jejich návrhu jsem vycházel z obecně platných pravidel a katalogových listů lineárních stabilizátorů. Výsledkem je kompletní obvodová struktura jednotlivých výše popsanych bloků, prototypový návrh desek plošných spojů a rozložení součástek na deskách.

V praktické části bakalářské práce jsem se věnoval výrobě prototypů jednotlivých výše popsanych modulů. U nejdůležitějších modulů jsem provedl experimentální měření v laboratoři. S výsledky měření jsem byl spokojen, největším překvapením je výrazný pokles  $THD + N$  spojený s výměnou operačního zesilovače v předzesilovači. Nejsem spokojen se zmenšující se hodnotou přeslechů předzesilovače, která byla na frekvenci 1 kHz asi 60 dB a na frekvenci 10 kHz činila asi 44 dB.

Dobrých výsledků měření koncového stupně bylo dosaženo pečlivým návrhem desky plošných spojů a vhodnou volbou kompenzačních kapacit, které byly voleny tak, aby nezhoršovaly dobré parametry zesilovače, ale zároveň byly voleny tak, aby byl s nimi koncový zesilovač stabilní.

Dobrou volbou se zdají být chladiče bufferů sluchátkového zesilovače, kdy i při trvalém zkratovém proudu se neaktivovala tepelná pojistka. Teplo generované obvodem, dokázal chladič efektivně vyzářit do okolí.

Do budoucna bych chtěl zesilovač rozšířit o dálkové přepínání vstupů (z tohoto důvodu bylo voleno přepínání vstupů enkodérem) a dálkové ovládání hlasitosti, provedeného pomocí elektromotoru, který otáčí potenciometrem hlasitosti. Dále by zesilovač šel doplnit teplotním čidlem, které by po připojení na procesor sledovalo teplotu chladiče koncových stupňů a v případě zvýšené teploty, by se zesilovač vypnul. Na realizaci těchto bloků nedošlo z důvodu velké komplexnosti výše popsanych modulů.

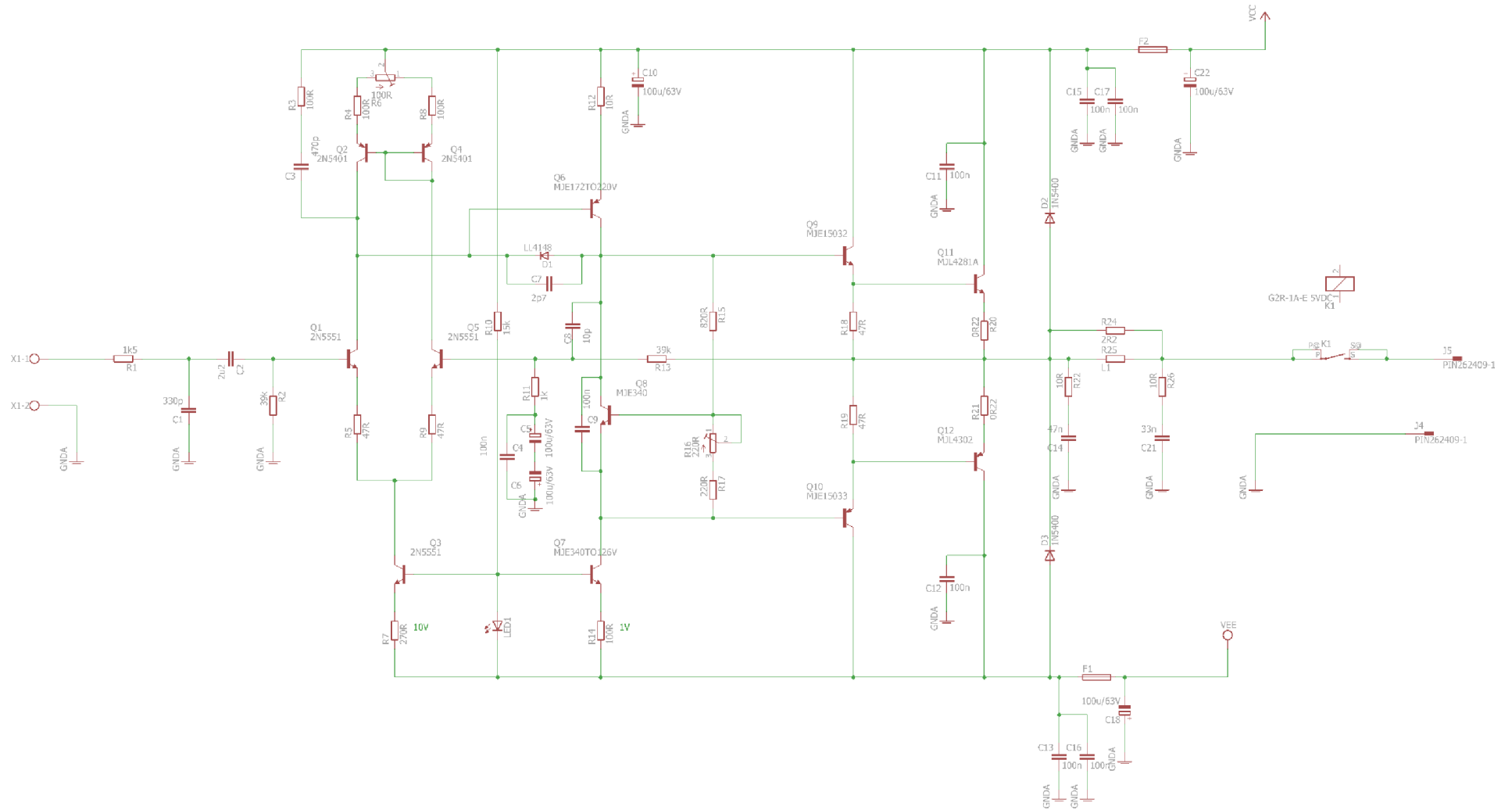
# Literatura

- [1] *Project 99 - subsonic filter* [online]. [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <http://sound.whsites.net/project99.htm>
- [2] *Project 97 - HIFI preamplifier* [online]. [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <http://sound.whsites.net/project97.htm>
- [3] Zosilňovač 100W [online]. [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <http://zosilnovace.eu/Zosilnovac100W.htm>
- [4] Amatérské rádio. 1992, 1992(10). ISSN 0322-9572.
- [5] Nízkofrekvenční výkonový zesilovač 50W. *Amatérské rádio řada B*. 2003, 52/2003
- [6] STACH, Jan. Výkonové tranzistory v nízkofrekvenčních obvodech. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979. Polovodičová technika.
- [7] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. NF zesilovače. ISBN 80-7300-053-9.
- [8] *Regulace hlasitosti s kvalitní fyziologií* [online]. [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <https://svetelektro.com/Forum/regulace-hlasitosti-s-kvalitni-fyziologii-t10597.html>
- [9] BUF634 250-mA High-Speed Buffer. *Http://www.ti.com/lit/ds/symlink/buf634.pdf* [online]. 2019, March 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/buf634.pdf>
- [10] KRATOCHVÍL, Tomáš. *Nízkofrekvenční a audio elektronika: Protokol měření č 2 a 3*. UREL VUT BRNO.
- [11] BRANČÍK, Lubomír a DOSTÁL, Tomáš. *Analogové elektronické obvody: přednášky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2007. ISBN 978-80-214-3525-4.

# Seznam příloh

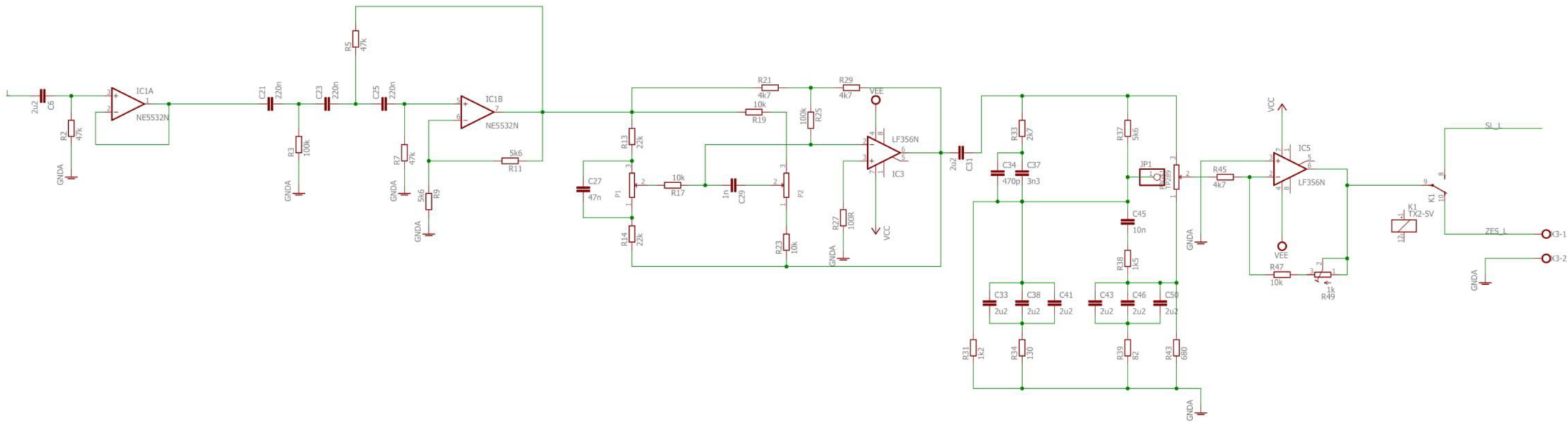
Příloha 1 - Schéma zapojení koncového stupně .....	1
Příloha 2 - Schéma zapojení předzesilovače.....	2
Příloha 3 - Deska plošných spojů koncového stupně .....	3
Příloha 4 - Deska plošných spojů předzesilovače.....	4
Příloha 5 - Osazení součástek na desce koncového stupně.....	5
Příloha 6 - Osazení součástek na desce předzesilovače.....	6
Příloha 7 - Schéma mikroprocesorového řízení.....	8
Příloha 8 - Deska plošných spojů mikroprocesorového řízení .....	9
Příloha 9 - Osazení součástek na desce mikroprocesorového řízení .....	10
Příloha 10 - Deska plošných spojů zdroje 45V.....	11
Příloha 11 - Osazení součástek na desce zdroje 45V.....	12
Příloha 12 - Deska plošných spojů zdroje 15V.....	13
Příloha 13 - Deska plošných spojů zdroje 5V.....	14
Příloha 14 - Deska plošných spojů Softstartu .....	15
Příloha 15 - Deska plošných spojů LED panelu a přepínačů.....	16
Příloha 16 - Soupiska součástek na jeden koncový stupeň.....	18
Příloha 17 - Soupiska součástek na oba kanály předzesilovače a sluchátkového zesilovače a přepínače vstupů .....	20
Příloha 18 - Soupiska součástek na 5V zdroj .....	22
Příloha 19 - Soupiska součástek na 15V zdroj .....	23
Příloha 20 - Soupiska součástek na jeden 42V zdroj.....	24
Příloha 21 - Soupiska součástek na softstart.....	25
Příloha 22 - Soupiska součástek na mikroprocesorové řízení a přední panely.....	26
Příloha 23 - Soupiska součástek, které nejsou umístěny na DPS .....	27
Příloha 24 - Výkres stříhu.....	28
Příloha 25 - Popis předního panelu.....	29
Příloha 26 - Výkres falešného dna a horního víka.....	30
Příloha 27 - Fotodokumentace .....	31

# Příloha 1 - Schéma zapojení koncového stupně



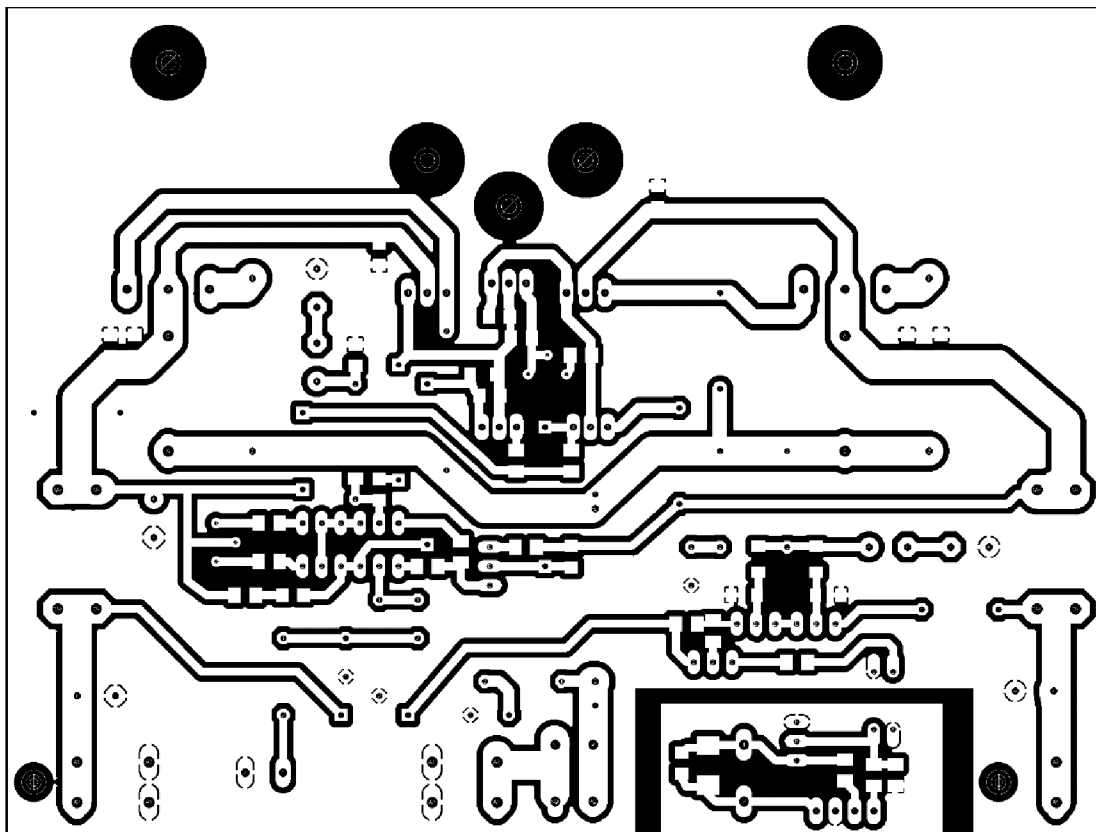
Příloha 1 – Schéma zapojení koncového stupně

## Příloha 2 - Schéma zapojení předzesilovače



Příloha 2 – Schéma zapojení předzesilovače, korekci, ovládání hlasitosti

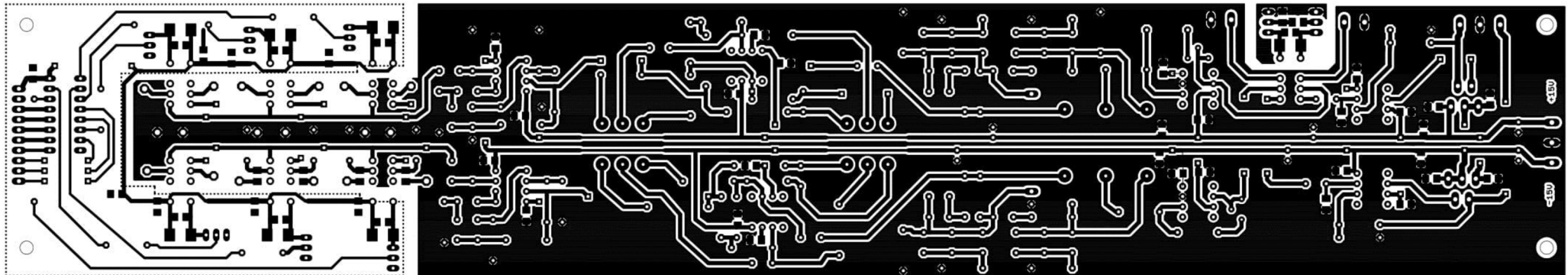
## Příloha 3 - Deska plošných spojů koncového stupně



Příloha 3 – DPS koncového stupně, strana BOTTOM, M 1:1, skutečný rozměr 109 x 147 mm, zrcadleno, invertováno

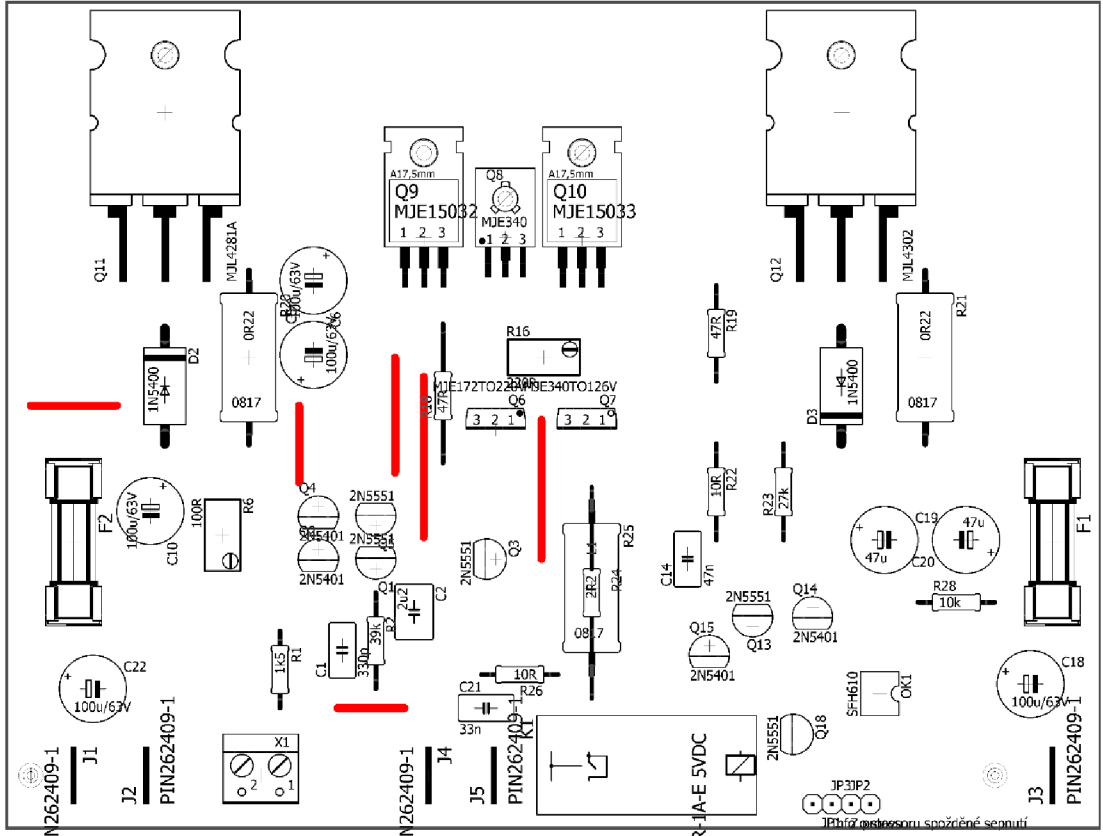
## Příloha 4 - Deska plošných spojů předzesilovače

*Pozn. Deska je zmenšena na 70% své velikosti.*

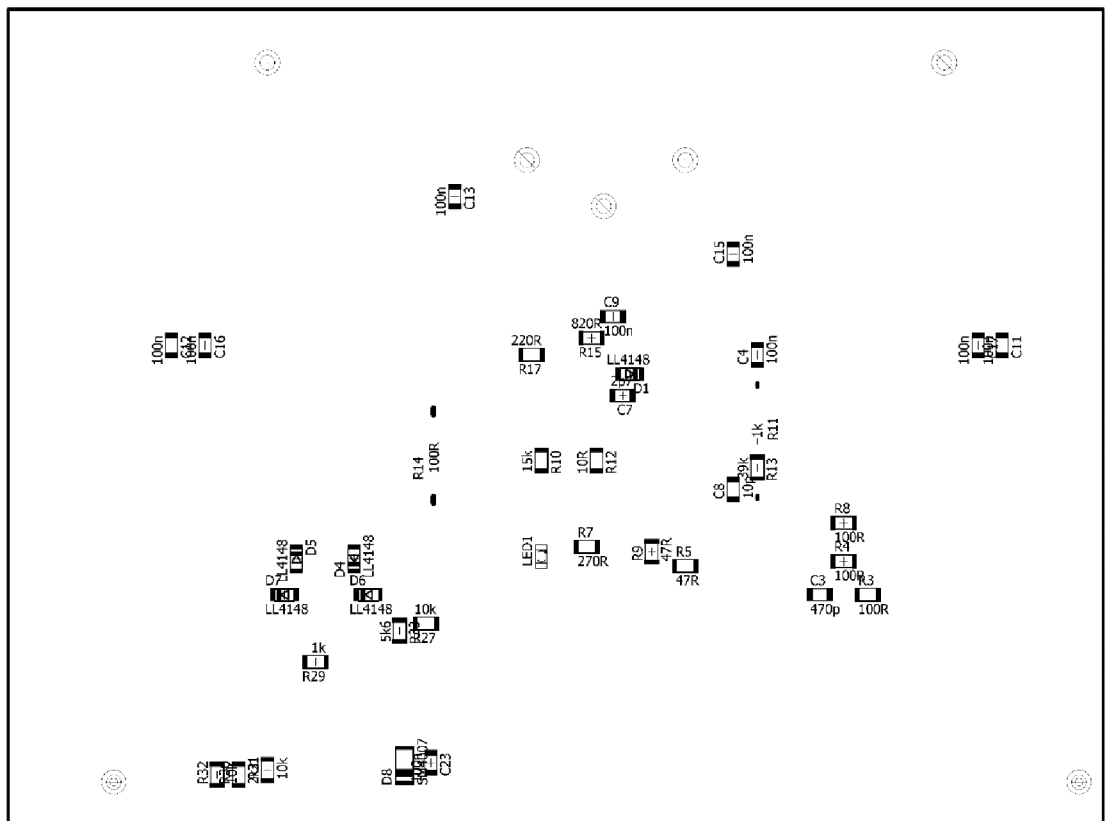


**Příloha 4 – DPS předzesilovače, korekcí, přepínače vstupů a sluchátkového zesilovače,  
strana BOTTOM, skutečný rozměr 72 x 392 mm, zrcadleno**

# Příloha 5 - Osazení součástek na desce koncového stupně



Příloha 6 – Osazení koncového stupně strana TOP

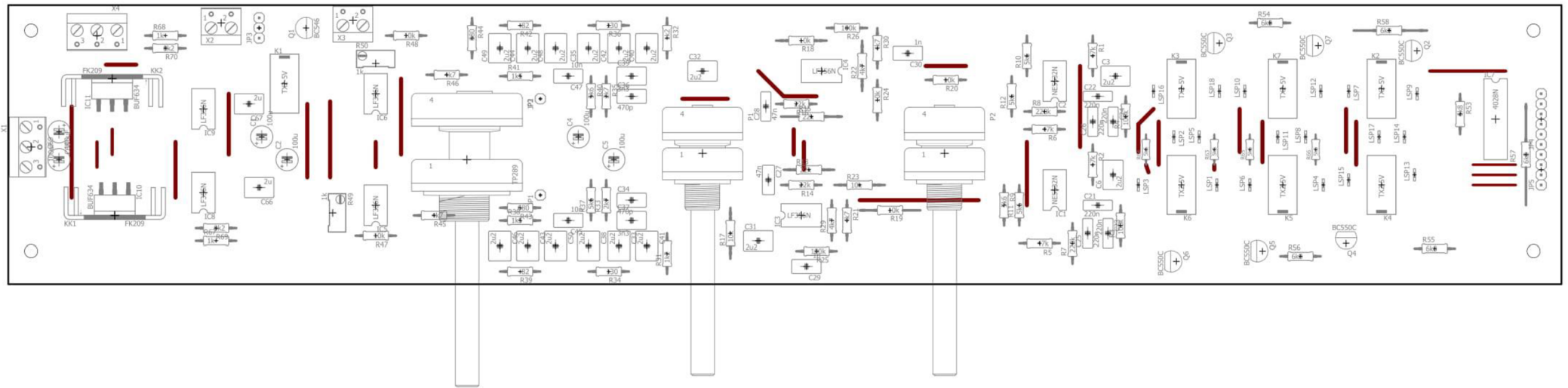


Příloha 5 – Osazení koncového stupně strana BOTTOM, zrcadleno

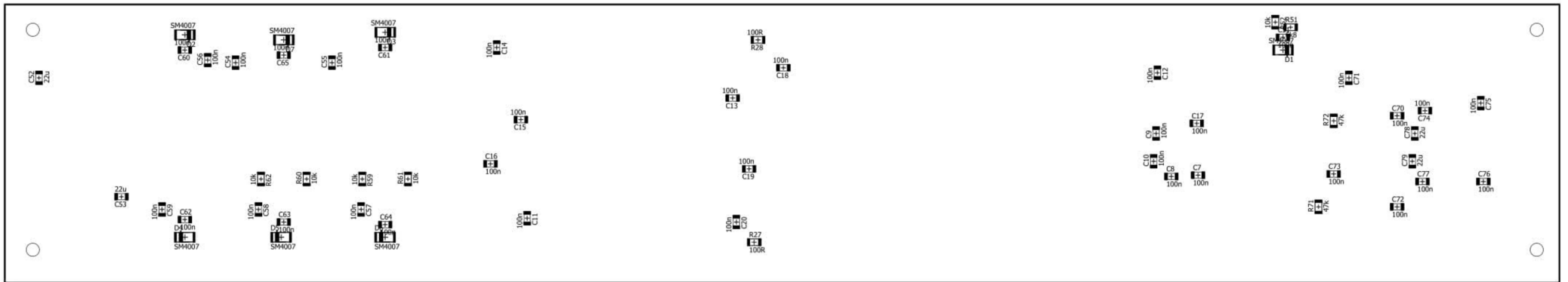


# Příloha 6 - Osazení součástek na desce předzesilovače

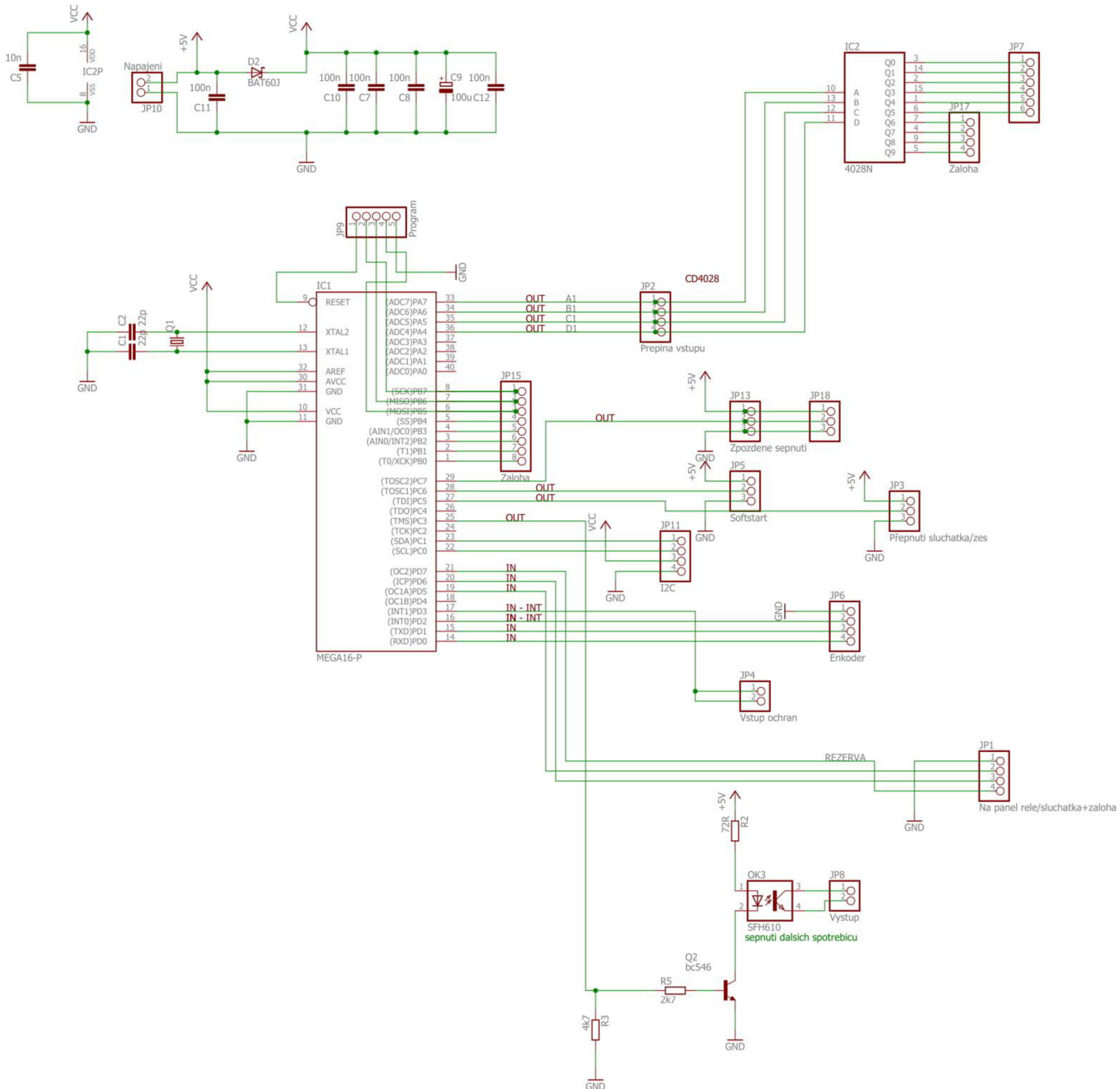
Pozn. Desky jsou zmenšeny na 70% své velikosti.



Příloha 7 – Osazení desky předzesilovače, strana TOP

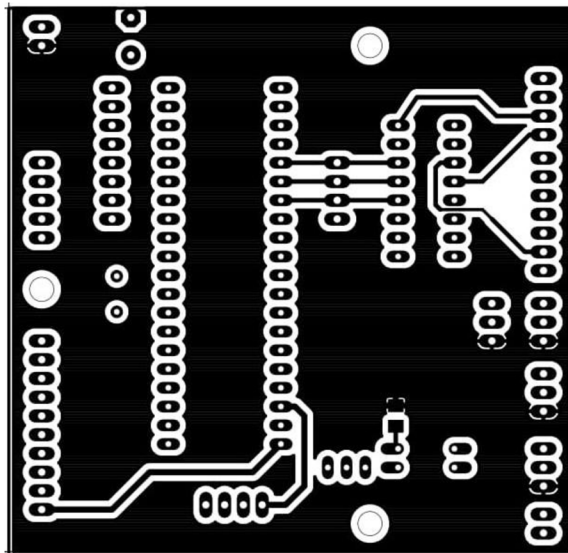


# Příloha 7 - Schéma mikroprocesorového řízení

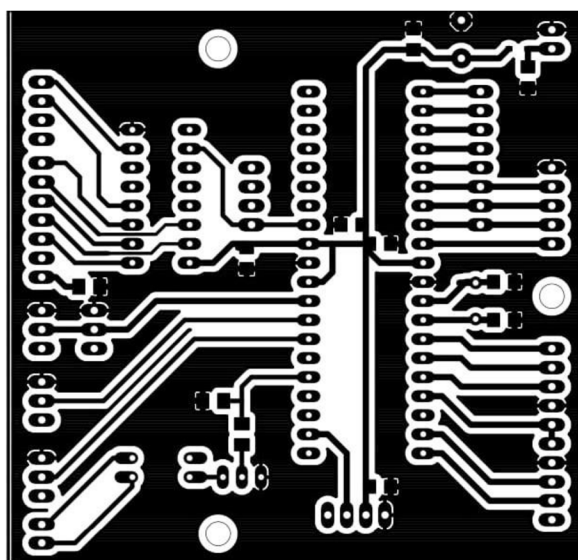


Příloha 9 – Schéma zapojení mikroprocesorového řízení

## Příloha 8 - Deska plošných spojů mikroprocesorového řízení

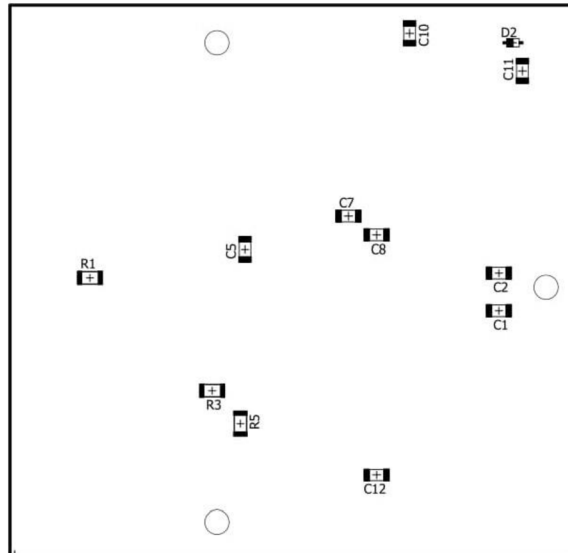


Příloha 10 – DPS mikroprocesorového řízení, strana TOP,  
M 1:1, skutečný rozměr 73,6 x 75,6 mm

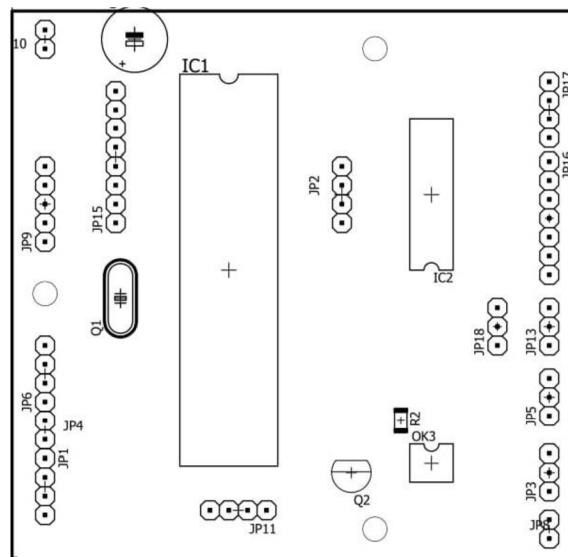


Příloha 11 – DPS mikroprocesorového řízení, strana BOTTOM,  
M 1:1, skutečný rozměr 73,6 x 75,6 mm, zrcadleno

## Příloha 9 - Osazení součástek na desce mikroprocesorového řízení

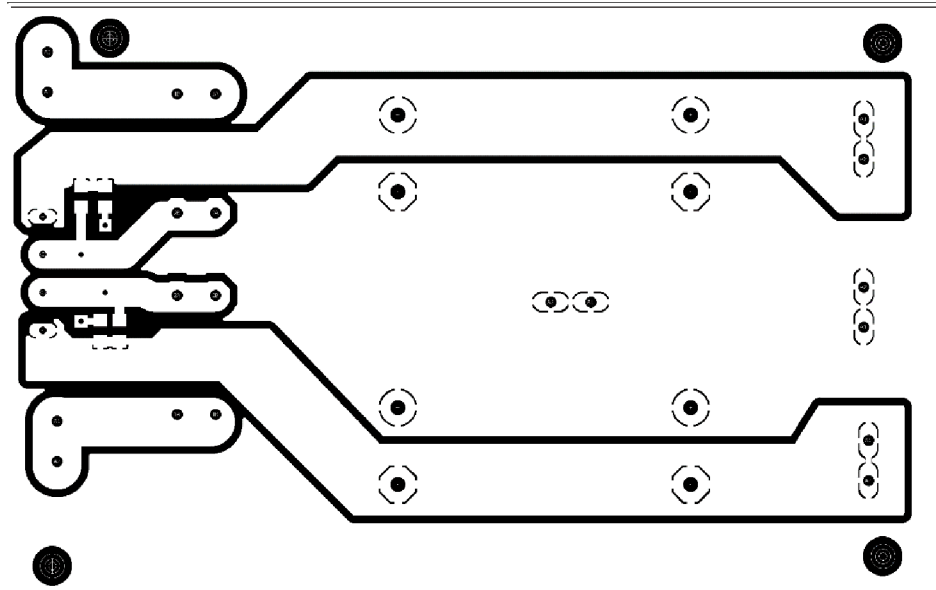


Příloha 13 – Osazení DPS, strana BOTTOM, zrcadleno



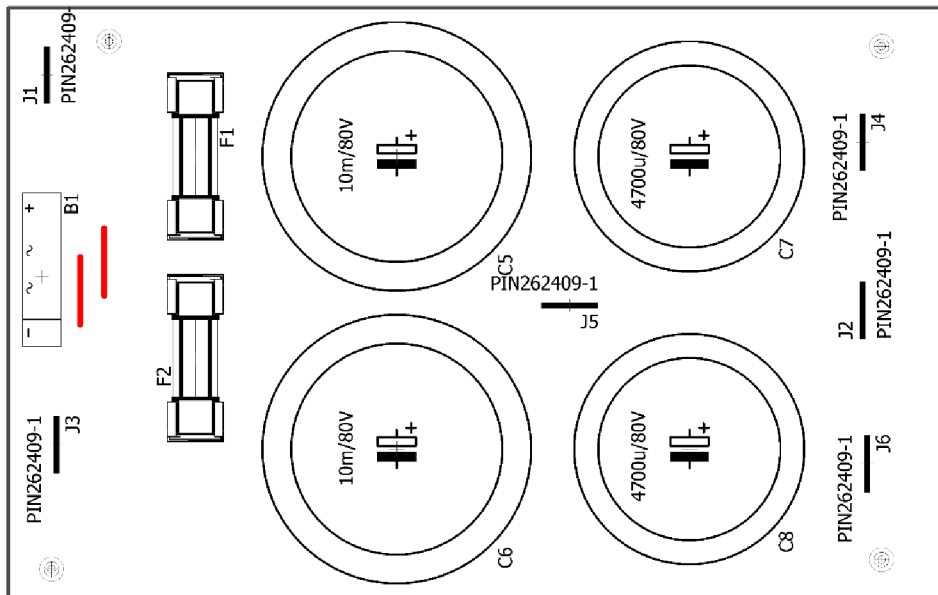
Příloha 12 – Osazení DPS, strana TOP

## Příloha 10 - Deska plošných spojů zdroje 45V



Příloha 14 – DPS zdroje 45V, strana BOTTOM, M 1:1, skutečný rozměr 123 x 78 mm, zrcadleno, invertováno

## Příloha 11 - Osazení součástek na desce zdroje 45V

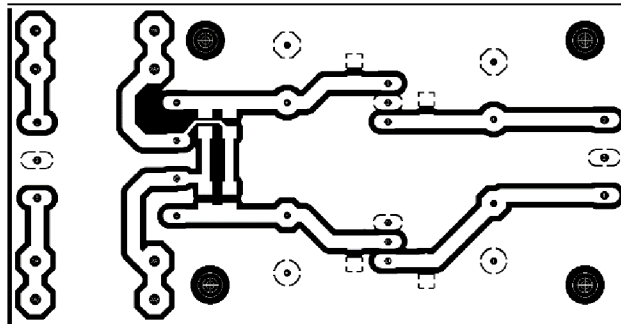


## Příloha 15 – Umístění součástek, strana TOP

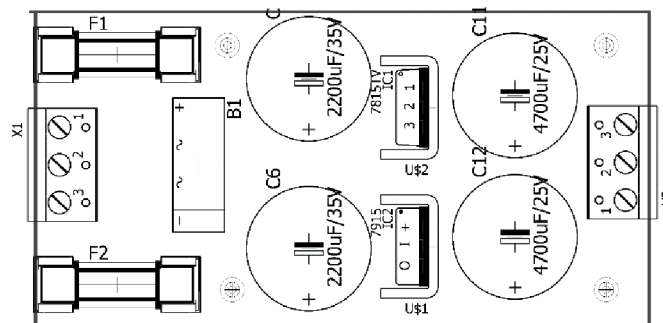


## Příloha 16 – Umístění součástek, strana BOTTOM, zrcadleno

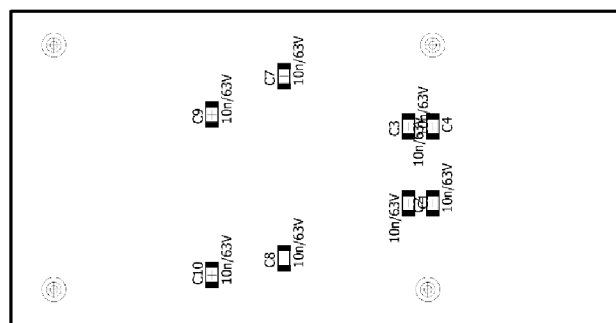
## Příloha 12 - Deska plošných spojů zdroje 15V



Příloha 17 – DPS zdroje 15V, strana BOTTOM, M 1:1, skutečný rozměr 81 x 42 mm, zrcadleno, invertováno



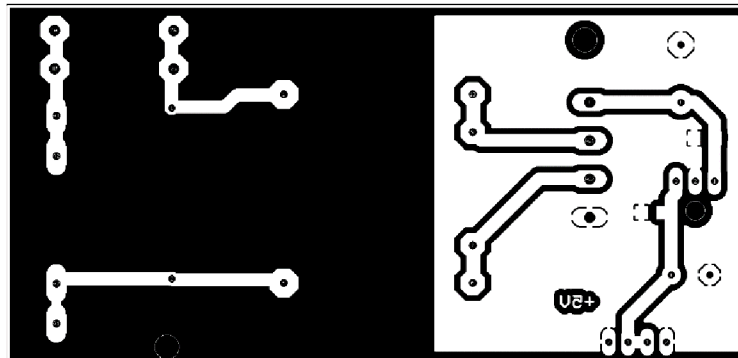
Příloha 18 – Umístění součástek, strana TOP



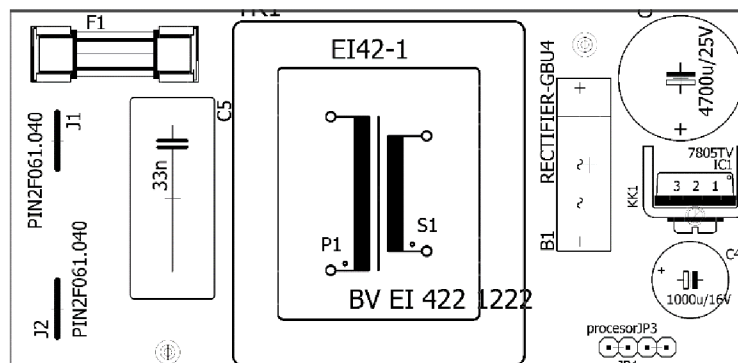
Příloha 19 – Umístění součástek, strana BOTTOM, zrcadleno



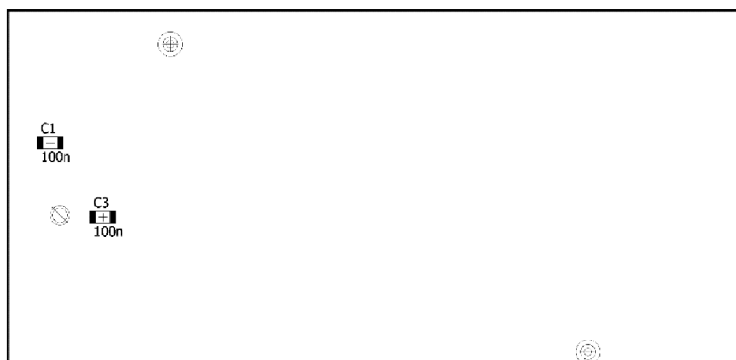
## Příloha 13 - Deska plošných spojů zdroje 5V



Příloha 20 – DPS zdroje 5V, strana BOTTOM, M 1:1, skutečný rozměr 98 x 46 mm, zrcadleno, invertováno

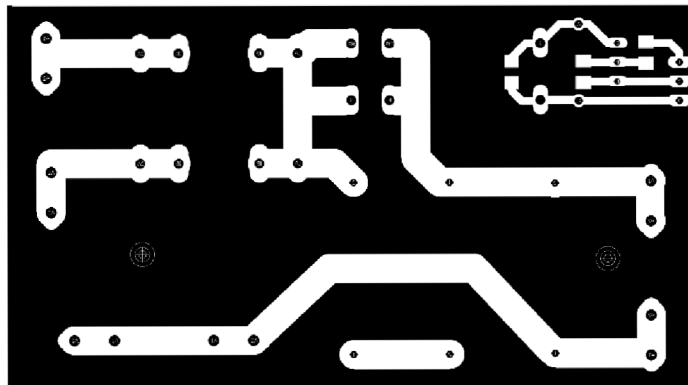


Příloha 21 – Umístění součástek, strana TOP

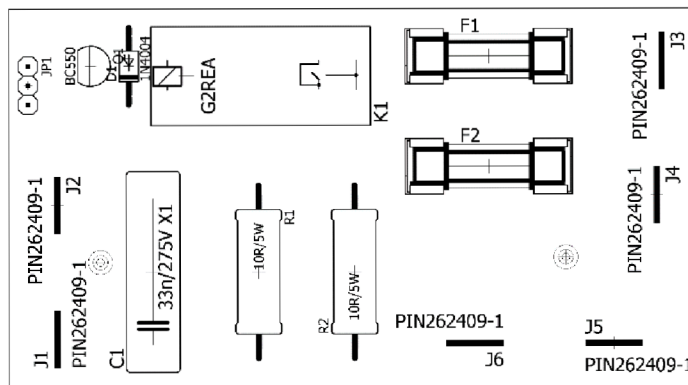


Příloha 22 – Umístění součástek, strana BOTTOM, zrcadleno

## Příloha 14 - Deska plošných spojů Softstartu

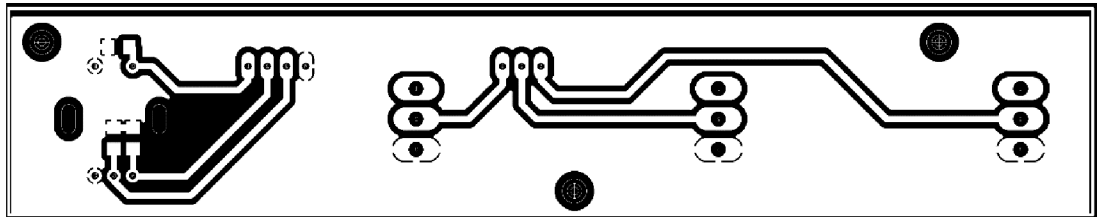


Příloha 23 – DPS Softstartu, strana BOTTOM, M 1:1, skutečný rozměr 91 x 51 mm, zrcadleno, invertováno

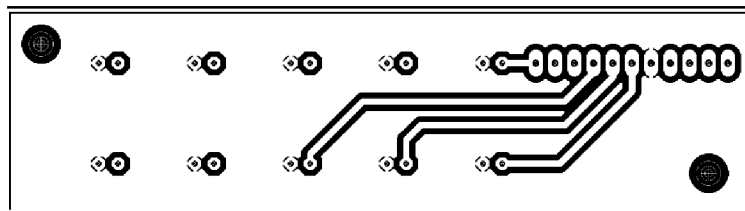


Příloha 24 – Umístění součástek, strana TOP

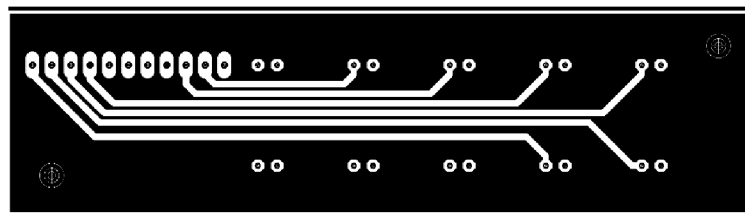
## Příloha 15 - Deska plošných spojů LED panelu a přepínačů



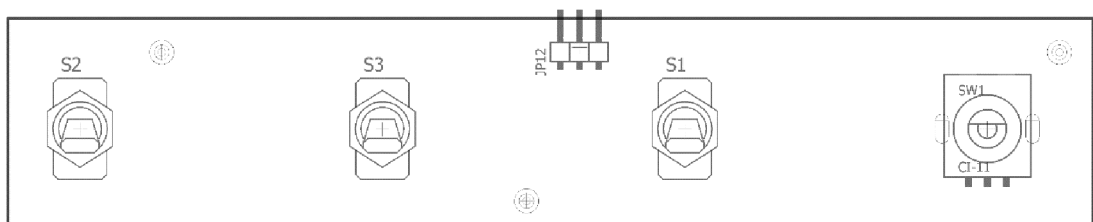
Příloha 25 – DPS přepínačů, strana BOTTOM, M 1:1, skutečný rozměr 143 x 27 mm, zrcadleno, invertováno



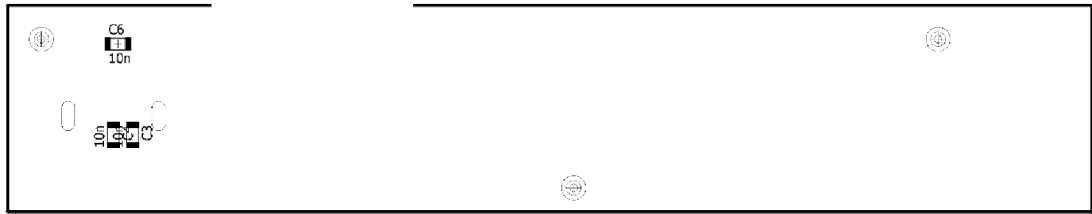
Příloha 26 – DPS LED panelu, strana BOTTOM, M 1:1, skutečný rozměr 98 x 27 mm, zrcadleno, invertováno



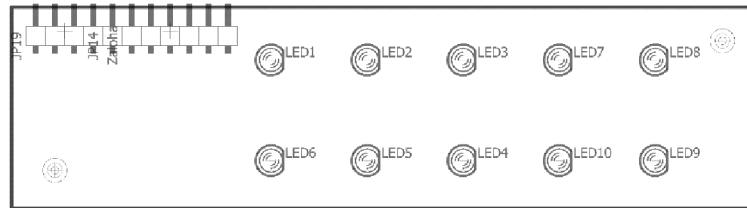
Příloha 27 – DPS LED panelu, strana TOP, M 1:1, skutečný rozměr 98 x 27 mm, invertováno



Příloha 28 – Umístění součástek na DPS přepínačů, strana TOP



**Příloha 29 – Umístění součástek na DPS přepínačů, strana BOTTOM, zrcadleno**



**Příloha 30 – Umístění součástek na DPS LED panelu, strana TOP**

## Příloha 16 - Soupiska součástek na jeden koncový stupeň

### Kondenzátory

Označení	Hodnota [F]	Pouzdro	Napětí	Poznámka
C1	330p	35x75 RM5		
C2	2 $\mu$ 2	35x75 RM5		
C3	470p	1206	100V	Kompenzační
C4, C9, C11, C12, C13, C15, C16, C17, C23	100n	1206	100V	
C5, C6, C10, C18, C22	100 $\mu$	R8,5 RM5	63V	
C7	2p7	1206	100V	Kompenzační
C8	10p	1206	100V	Kompenzační
C14	47n	35x75 RM5		
C19, C20	47 $\mu$	R8,5 RM5	100V	
C21	33n	35x75 RM5		

### Rezistory

Označení	Hodnota [ $\Omega$ ]	Pouzdro	Výkon	Poznámka
R1	1k5	0207/15	0,6W	
R2	39k	0207/12	0,6W	
R3, R4, R8	100R	1206	0,25W	
R5, R9	47R	1206	0,25W	
R6	100R			Trimr
R7	27k	1206	0,25W	
R10	15k	1206	1W	
R11	1k	0207/15	0,6W	
R12	10R	1206	1W	
R13	39k	1206	0,25W	
R14	100R	0207/12	0,6W	
R15	820R	1206	0,25W	
R16	220R			Trimr
R17	220R	1206	0,25W	
R18, R19	47R	0207/15	0,6W	
R20, R21	0R22	0817/22	5W	
R22	10R	0207/12	0,6W	
R23	27k	0207/12	0,6W	
R24	2R2	0817/22	5W	
R26	10R	0207/10	3W	
R27, R31, R32	10k	1206	0,25W	

R28	10k	0217/10	0,6W	
R29	1k	1206	0,25W	
R30	2k2	1206	0,25W	

#### Aktivní prvky

Označení	Označení	Pouzdro	Poznámka
Q1, Q3, Q5, Q13	2N5551	TO92	
Q2, Q4, Q14, Q15	2N5401	TO92	
Q6	MJE172	TO126	
Q7,Q8	MJE340	TO126	
Q9	MJE15032	TO220	
Q10	MJE15033	TO220	
Q11	MJL4281	TO247	
Q12	MJL4302	TO247	
Q16	BC550C	TO92	
D1, D4, D5, D6, D7	1N4148	DO213	
D2, D3	1N5401	DO201	
D8	1N4007	DO213	
LED1	červená	1206	
OK1	SFH601	DIL4	Optočlen

#### Ostatní součástky

Označení	Označení	Pouzdro	Poznámka
K1	G2R-1A-5V		Výstupní relé
J1, J2, J3, J4, J5	Faston	6,3x0,8mm	
JP1, JP2, JP3, X1	Svorkovnice	RM5	
F1, F2	Pojistka + držák	5x20mm	F3,15A
L1	Cívka	11z./R10 1,5mm drát	

# Příloha 17 - Soupiska součástek na oba kanály předzesilovače a sluchátkového zesilovače a přepínače vstupů

## Kondenzátory

Označení	Hodnota [F]	Pouzdro	Napětí	Poznámka
C1, C2, C4, C5, C68, C69	100 $\mu$	R6 RM2,5		
C3, C6, C31, C32, C33, C35, C38, C40 – C44, C46, C48, C49, C50, C66, C67	2 $\mu$ 2	35x75 RM5		
C7 – C20, C51, C54 – C65, C70 – C79	100n	1206		
C21 – C26	220n	25x75 RM5		
C27, C28	47n	30x75 RM5		
C29, C30	1n	35x75 RM5		
C34, C36	470p	35x75 RM5		
C37, C39	3n3	45x75 RM5		
C45, C47	10n	35x75 RM5		
C52, C53	22 $\mu$	1206	16 V	Použity v 5V napájení IO

## Rezistory

Označení	Hodnota [ $\Omega$ ]	Pouzdro	Poznámka
R1, R2, R5, R6	47k	0207/10	
R3, R4, R25, R26	100k	0207/10	
R7, R8	220k	0207/10	
R9 – R12, R37, R40	5k6	0207/10	
R13 – R16	22k	0207/10	
R17, R18, R23	10k	0207/12	
R19, R24	10k	0207/15	
R20, R47, R48	10k	0207/10	
R21, R29, R30, R45, R46	4k7	0207/10	
R22	4k7	0207/12	
R27, R28	100R	1206	
R31, R32	1k2	0207/10	
R33, R35	2k7	0207/10	

R34, R36	130R	0207/10	
R38, R41	1k5	0207/10	
R39, R42	82R	0207/10	
R43, R44	680R	0207/10	
R49, R50	1k		Trimr
R51	6k8	1206	
R52	10k	1206	
R53 – R58	6k8	0207/10	
R59 – R62	10k	1206	
R63 – R66	5k6	0204/7	
R67, R68	1k	0207/10	
R69, R70	8k2	0207/10	
R71, R72	47k	1206	
P1, P2	100k/N		Potenciometr lineární
P3	25k/Y	TP289	Potenciometr logaritmický odbočkou

#### Aktivní prvky

Označení	Označení	Pouzdro	Poznámka
D1 – D7	SM4007	DO213AB	
IC1, IC2	NE5532N	DIL8	
IC2 – IC6, IC8, IC9	LF356	DIL8	
IC7	4028	DIL16	
IC10, IC11	BUF634	TO220 – 5	
Q1 – Q7	BC550	TO92	

#### Ostatní součástky

Označení	Označení	Pouzdro	Poznámka
K1 – K7	TX2 - 5V		Signálové relé
JP1 – JP5	Svorkovnice	RM5	
LSP1 – LSP18	Faston	2,8 mm	
KK1, KK2	Chladiče CH12 / 50	50 x 29 x 11,5mm	Chladiče bufferů
X1 – X4		RM2,54	Hřebínek



## Příloha 18 - Soupiska součástek na 5V zdroj

### Kondenzátory

Označení	Hodnota [F]	Pouzdro	Napětí	Poznámka
C1, C3	100n	1206	100V	
C2	4700 $\mu$	R16 RM7,5	25V	
C4	1000 $\mu$	R10,5 RM5	16V	
C5	33n	268x113 RM 22,5	275V	X1

### Ostatní

Označení	Hodnota	Pouzdro	Výkon	Poznámka
IC1	7805	TO220	5V/ 2A	Kladný stabilizátor napětí
B1	GBU4			Můstek usměrňovací
F1	Pojistka + držák	5x20mm		T32mA
TR1	9V/ 600mA	EI42		
KK1				Chladič TO220
J1, J2	Faston	6,3x0,8		
JP1, JP2		RM2,54		Hřebinková lišta

## Příloha 19 - Soupiska součástek na 15V zdroj

### Kondenzátory

Označení	Hodnota [F]	Pouzdro	Napětí	Poznámka
C1, C2, C3, C4, C7, C8, C9, C10	100n	1206	100V	
C5, C6	2200 $\mu$	R16 RM7,5	35V	
C11, C12	4700 $\mu$	R16 RM7,5	25V	

### Ostatní

Označení	Hodnota	Pouzdro	Výkon	Poznámka
IC1	7815	TO220	15V / 2A	Kladný stabilizátor napětí
IC2	7915	TO220	-15V / 2A	Záporný stabilizátor napětí
B1	GBU4			Můstek usměřovací
F1, F2	Pojistka + držák	5x20mm		T2A
X1, X2		3x RM5		Svorkovnice
TR1	2x19V 2x1,31A	85x35	50VA	Toroidní transformátor, není na DPS

## Příloha 20 - Soupiska součástek na jeden 42V zdroj

### Kondenzátory

Označení	Hodnota [F]	Pouzdro	Napětí	Poznámka
C1, C2, C3, C4	100n	1206	100V	
C5, C6	10000 $\mu$	R35 RM10	80V	SNAP-IN
C7, C8	4700 $\mu$	R30 RM10	80V	SNAP-IN

### Ostatní

Označení	Hodnota	Pouzdro	Výkon	Poznámka
B1	FB15A		10A	Můstek usměřovací
F1, F2	Pojistka + držák	5x20mm		T5A
J1 - J6	Faston	6,3x0,8		
TR1	2x35V 2x4,28A	118x58	300VA	Toroidní transformátor, není na DPS

## Příloha 21 - Soupiska součástek na softstart

### Kondenzátory

Označení	Hodnota [F]	Pouzdro	Napětí	Poznámka
C1	33n	268x113 RM 22,5	275V	X1
C2	100n	1206	100V	

### Ostatní

Označení	Hodnota	Pouzdro	Výkon	Poznámka
R1, R2	10R	0817/22	5W	
R3	10k	1206	0,25W	
R5	2k2	1206	0,25W	
Q1	BC550	TO92		
D1	1N4007	DO41		
K1	G2R-1A-5V			Relé
F1, F2	Pojistka + držák	5x20mm		T2A
J1 - J6	Faston	6,3x0,8		
JP1		RM2,54		Hřebínková lišta

## Příloha 22 - Soupiska součástek na mikroprocesorové řízení a přední panely

### Kondenzátory

Označení	Hodnota [F]	Pouzdro	Napětí	Poznámka
C1, C2	22p	1206		Kompenzační
C3, C4, C6	10n	1206		Kompenzační
C5, C7, C8	100n	1206		
C9	100 $\mu$	R8,5 RM5		
C10, C11, C12	100n	1206		

### Aktivní prvky

Označení	Označení	Pouzdro	Poznámka
D2	BAT48	SOD323	
IC1	MEGA16	DIL40	
IC2	4028	DIL16	
LED1 – LED10		3 mm	Led zelená
OK3	SFH610	DIL4	Optočlen
Q1	16MHz	HC49/S	
Q2	BC550	TO92	

### Odpory

Označení	Hodnota [ $\Omega$ ]	Pouzdro	Výkon	Poznámka
R1	150R	1206		
R2	72R	1206		
R3	10k	1206		
R5	3k3	1206		

### Ostatní

Označení	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
S1, S2, S3		3x RM5	
SW1	PEC11L	11 mm	enkodér
JP1 – JP19		RM 2,54	Hřebínek

## Příloha 23 - Soupiska součástek, které nejsou umístěny na DPS

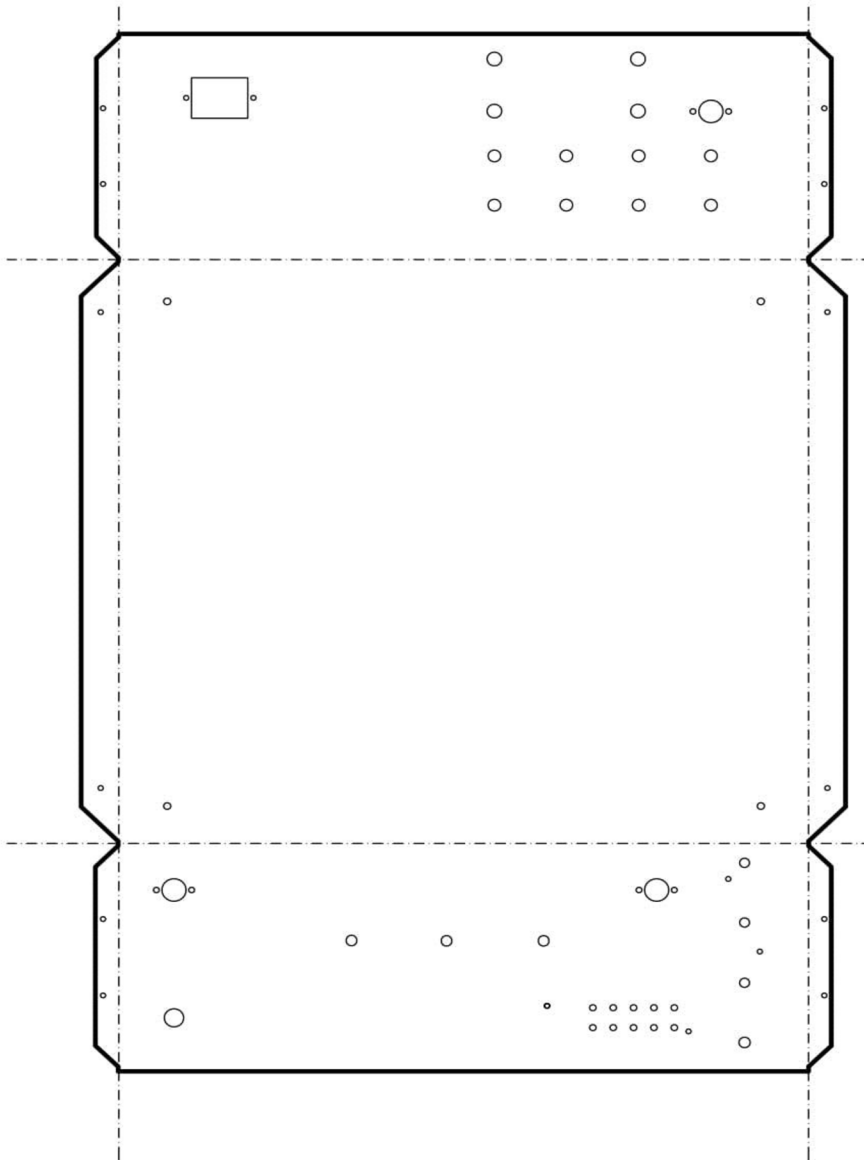
### Konektory

Označení	Pouzdro	Poznámka
CON1 – CON4	CINCH	Červený
CON4 – CON8	CINCH	Černý
CON9 – CON11	DIN5	
CON12, CON13	Banánek D4	Červený
CON14, CON15	Banánek D4	Černý
CON16	Napájecí konektor	Se síťovým filtrem 16A / 230V

### Ostatní

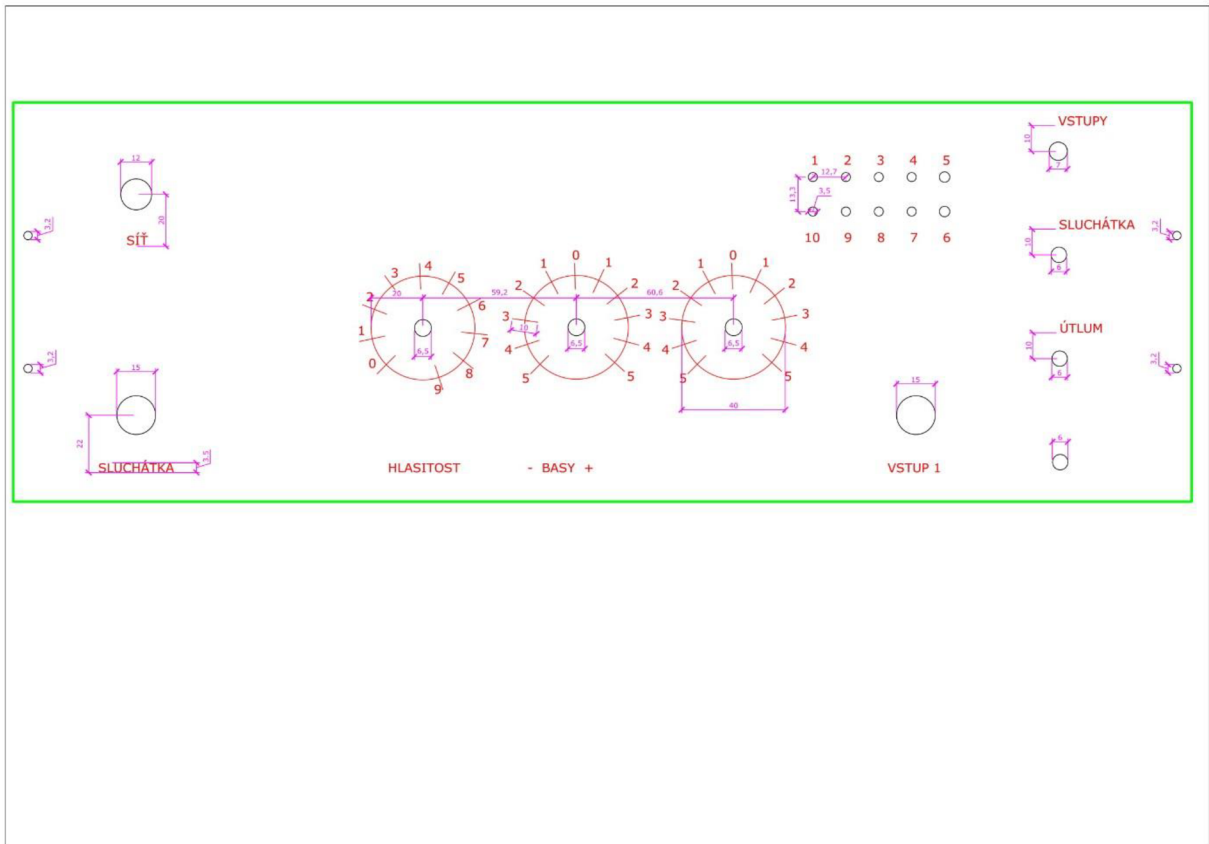
Označení	Pouzdro	Poznámka
Síťový spínač		16A

## Příloha 24 - Výkres stříhu



Příloha 31 – Výkres stříhu skříně, M1:5

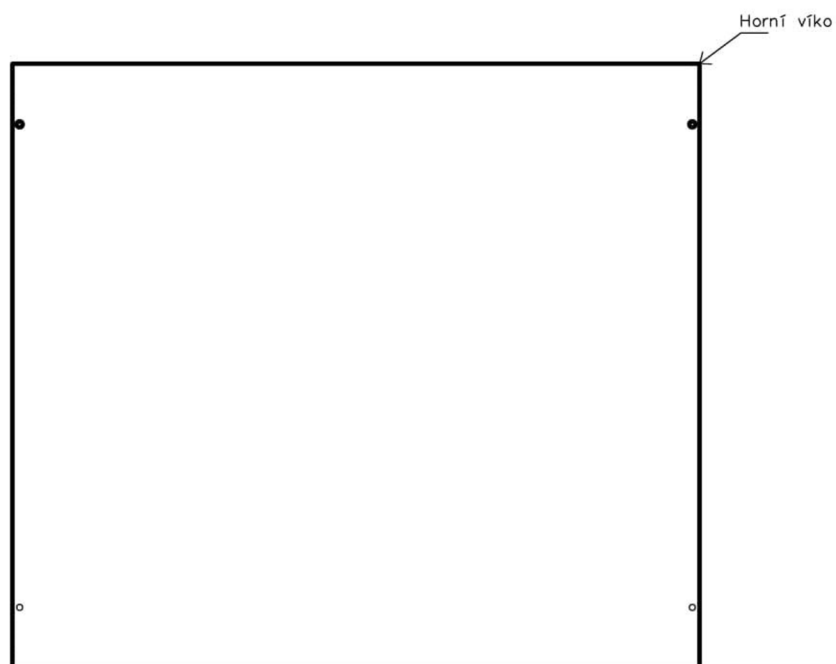
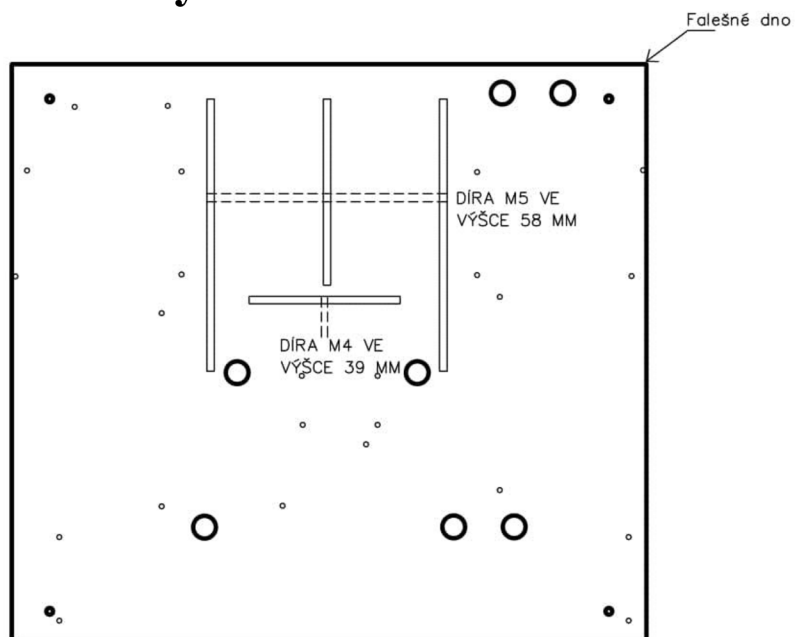
## Příloha 25 - Popis předního panelu



Příloha 33 – Popisky předního panelu, rozměry v [mm]

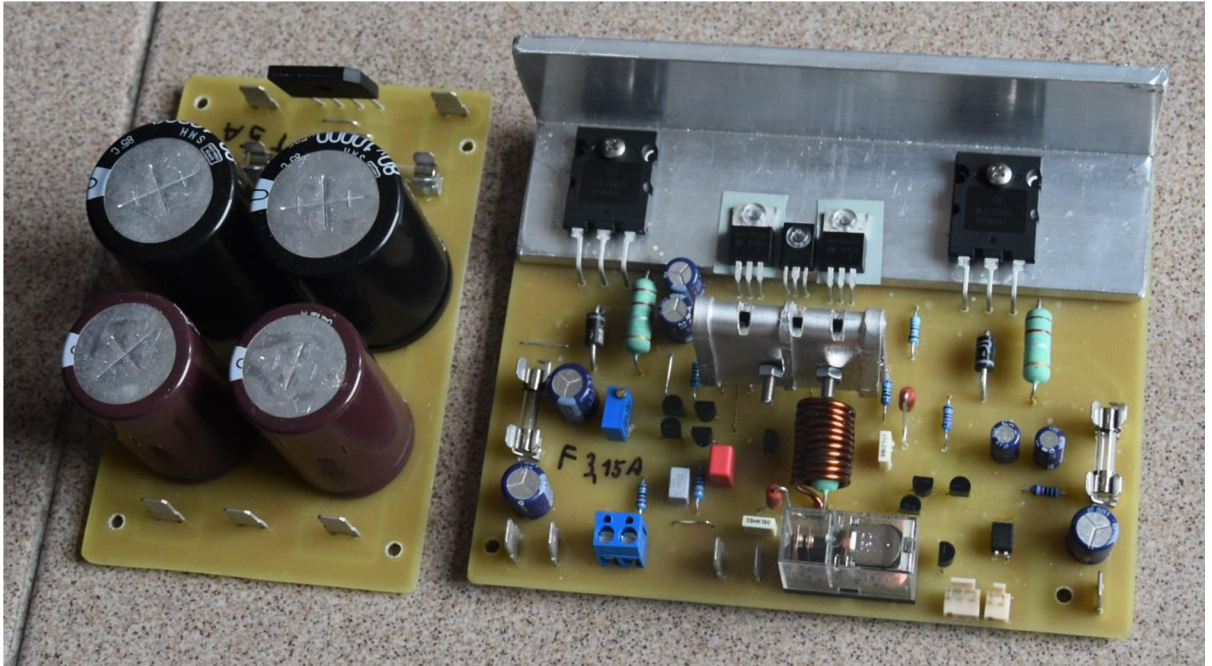


## Příloha 26 - Výkres falešného dna a horního víka



Příloha 34 – Výkres falešného dna a horního víka, M 1:5

## Příloha 27 - Fotodokumentace



Příloha 35 – Fotografie jednoho koncového stupně a jeho zdroje



Příloha 36 – Fotografie (zprava) přepínače vstupů, předzesilovače a sluchátkového zesilovače



**Příloha 37 – Vnitřní pohled do skříně zesilovače**



**Příloha 38 – Pohled na přední panel skříně**