



Středoškolská technika 2015

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

NF zesilovač pracující ve třídě A

Josef Houzar

SPŠ A VOŠ PÍSEK

Karla Čapka 402, 397 11 Písek

Anotace:

Tato dlouhodobá maturitní práce se zabývá teorií tranzistorových NF zesilovačů. Na několika prvních stránkách se budu zamýšlet nad obecnými fakty o zesilovačích (jejich dělení, vlastnosti, třídy, poloha a nastavení pracovního bodu, ...). Ovšem hlavní část této práce tvoří popis a charakteristika mnou vyrobeného zesilovače. Jedná se o NF zesilovač pracující ve třídě A s výkonovým stupněm v jednočinném zapojení. V této části podrobně popíši a vysvětlím návrh celého zařízení a poté i jednotlivých stupňů, výklad doplním potřebnými schématy a výpočty. V samotném závěru důkladně zhodnotím dosažené výsledky.

Annotations:

This graduation work deals with theory of transistors low-frequency amplifiers. On the first pages is a general facts of amplifiers (properties, classes, setting the operating point, ...). In main part of this work is the characteristic of my home-made amplifier. It is a low-frequency amplifier, that is operating in the Class A. Output stage works in Single-ended. In this part is the detailed description and explain of the design of entire device and also individual stages. Interpretation will fulfill of the necessary schemes and the calculations. In the end is the thorough evaluating the results achieved.

Klíčová slova:

Předzesilovač, výkonový stupeň, pracovní bod, účinnost.

Keywords:

Preamplifier, output stage, operating point, efficiency.

Obsah

1. Úvod – Obecně o NF zesilovačích	10
1.1 – Vazby mezi stupni zesilovače.....	11
1.2 – Parametry zesilovačů.....	12
1.3 – Třídy zesilovačů.....	13
2. Popis vlastního zesilovače – Úvod.....	14
2.1 – Koncový stupeň.....	15
2.1.1 – První návrh.....	16
2.1.2 – Proudový zdroj.....	17
2.1.3 – Výsledné řešení.....	18
2.2 – Předzesilovač – Impedanční přizpůsobení.....	20
2.2.1 – Korekční zesilovač.....	21
2.2.2 – Korekce + parametry tranzistoru KC508.....	22
2.2.3 – Vstupní zesilovač.....	23
2.2.4 – Regulátor hlasitosti.....	24
2.2.5 – Vstupní impedanční zesilovač.....	25
2.3 – Napájecí zdroj.....	26
2.3.1 – Filtrace.....	27
2.3.2 – Stabilizace napětí pro ventilátor a indikátor.....	28
2.4 – Chlazení + jištění.....	29
3. Vyhodnocení výsledků.....	31
3.1 – Závěr.....	32
4. Použitá literatura.....	34
5. Seznam obrázků.....	35

6. Seznam příloh.....	36
7. Přílohy.....	37- 49

1 Úvod – Obecně o NF zesilovačích

Nízkofrekvenční zesilovače jsou dnes již skoro v každém elektronickém zařízení (v radiopřijímačích, televizorech, MP3 přehrávačích, počítačích, mobilních telefonech, ...). Na

úvod bych ovšem pojem zesilovač rád nějak definoval: Zesilovač je elektronické zařízení (přístroj), jehož výstupní výkon signálu odevzdaný do spotřebiče je větší než výkon vstupní, potřebný k buzení. [1]

Typů zesilovačů je mnoho a je možno je podle různých kritérií rozdělit:

Dělení podle:

1.přenášených frekvencí: a) **nízkofrekvenční** – pracují v oblasti akustických frekvencí, v pásmu

20 Hz – 20 kHz

b) **vysokofrekvenční** – pracují v oblasti frekvencí nad 20kHz

c) **speciální (stejnoseměnné)** – pracují v pásmu frekvencí od 0Hz až do oblasti VF několik MHz

2.šířky pásma: a) **širokopásmové** – jejich frekvenční rozsah je velký

b) **úzkopásmové** – zesilují jen úzké frekvenční pásmo

3.použití: a) **zesilovače proudu** – od těchto zesilovačů požadujeme, aby změny výstupního proudu, vyvolané vstupním proudem byly co největší

b) **zesilovače napětí** – tyto zesilovače mají dát ve výstupním obvodu, co možná největší napětí, oproti napětí vstupnímu. Většinou mají zvětšit jen malé napětí, např.: z mikrofonu na hodnoty potřebné pro výkonové zesilovací stupně. Většinou tvoří první stupně zesilovačů – předzesilovače [2]

c) **zesilovače výkonu** – takovéto zesilovače mají odevzdat ve výstupním obvodu úměrný přivedenému výkonu na vstup. Jako zesilovače výkonu pracují výkonové nebo koncové stupně zesilovačů [2]

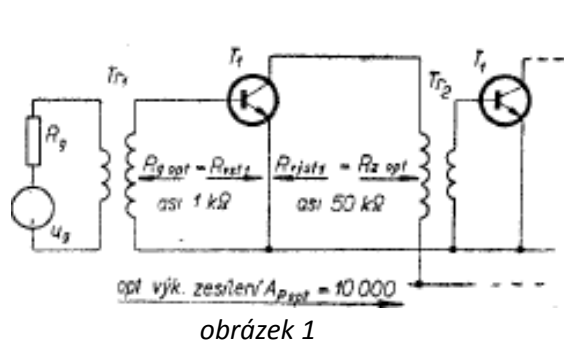
4. typu použitých zesilovacích součástek:

a) **elektronkové** – v dnešní době málo používané. Elektronky mají oproti tranzistorům (za správných pracovních podmínek) menší životnost a nutnost žhavení (zvětšuje celkový příkon)

- b) tranzistorové** – aktivními prvky jsou tranzistory. dnes nejběžněji používané zesilovače.
- c) hybridní** – v zesilovači jsou použity jako aktivní prvky tranzistory i elektronky (např.: předzesilovač – tranzistorový, většinou s unipolárními tranzistory, koncový stupeň – elektronkový)
- d) integrované** – v zesilovači jsou použity integrované obvody

1.1 5. Vazby mezi stupni:

a) transformátorová – jednotlivé stupně jsou navázány pomocí transformátoru. Především v předzesilovacím stupni se pomocí této vazby může dosáhnout maximálního

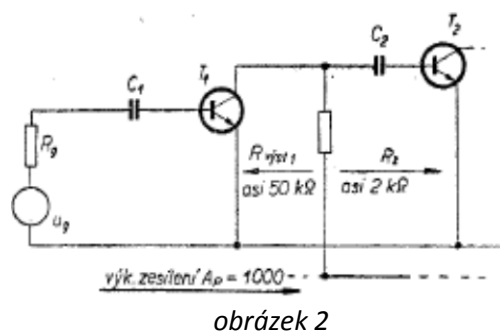


výkonového zesílení v $A_{P\text{opt}} = \frac{P_2}{P_1}$ tzv. přizpůsobeném stavu podle obrázku 1, kdy se vstupní odpor tranzistoru rovná vnitřnímu odporu zdroje signálu: $R_{vst1} = R_{g\text{opt}}$

výstupní odpor se rovná odporu zatěžovacímu: $R_{výst1} = R_{z\text{opt}}$ [3]

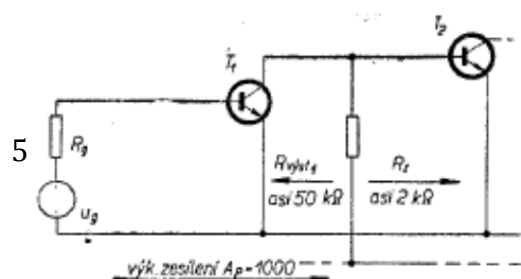
Pro každé základní zapojení je jen jediná hodnota optimálního vnitřního odporu generátoru a optimálního odporu zatěžovacího. Ve všech ostatních případech je výkonové zesílení menší než jaké tranzistor může v optimálně přizpůsobeném stavu poskytnout. [3] Výkonové zesílení při použití transformátorové vazby se běžně pohybuje kolem 40 dB. Ovšem k rozměrům (při dnešní miniaturizaci všech zařízení) a ceně transformátorů se tato vazba dnes používá jen výjimečně.

b) kapacitní – stupně zesilovače jsou navázány pomocí kondenzátoru. Tato vazba je dnes asi nejpoužívanější. Především pro její jednoduchost. Kondenzátory jsou malé, levné. Tato úspora



je však zaplácena horším impedančním přizpůsobením stupňů a tím i menším výkonovým zesílením (kolem 30 dB). Většinou se totiž nepodaří navrhnout zesilovací stupně tak, aby se výstupní impedance prvního rovnala vstupní impedanci druhého. (Viz obr. 2)

c) stejnosměrná – stupně v zesilovači jsou navázány přímo (stejnoseměrně). Tento druh vazby je dnes také poměrně často využíván. výhodou této vazby je to, že přenáší frekvence od 0 Hz, tzn. i stejnosměrné signály. Nevýhodou je to, že se jednotlivé stupně stejnosměrně ovlivňují,

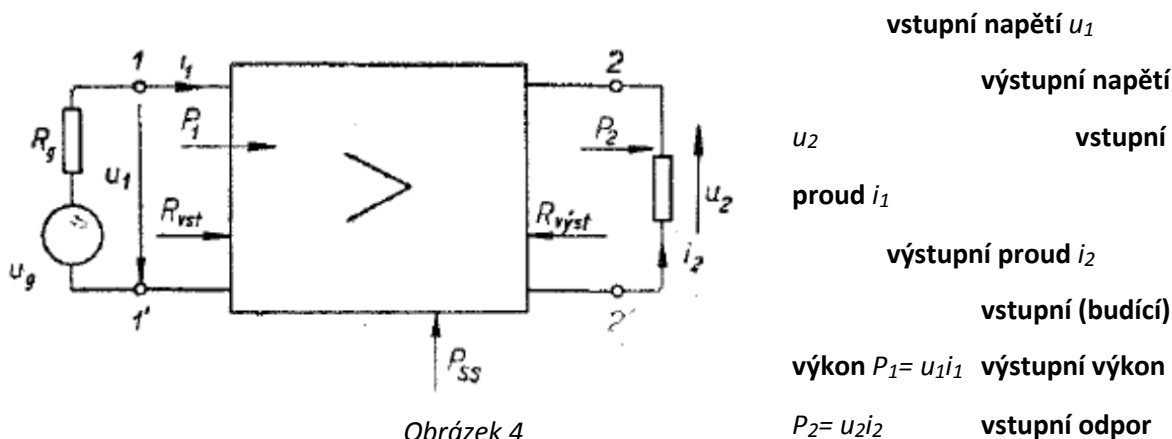


změní-li se poloha pracovního bodu prvního tranzistoru v předzesilovači, změní se poloha

pracovních bodů všech tranzistorů v celém zesilovači. Výkonový zisk je také kvůli nedokonalému imp. přizpůsobení malý (cca 30 dB).

1.2 Parametry zesilovačů

Parametrů zesilovačů je celá spousta, proto vyberu jen některé (nejdůležitější). Zesilovač si můžeme představit jako čtyřpól, který má vstupní svorky 1,1' a výstupní svorky 2,2'.



$R_{vst} = \frac{u_1}{i_1}$ **výstupní odpor** $R_{vyst} = \frac{u_2}{i_2}$ -srovnává se napětí u_2 a proud i_2 , přivedený ke svorkám

2,2' zvnějšku!

příkon napájení P_{SS}

účinnost $\eta =$

$$\frac{P_2}{P_{SS}} * 100$$

[%]

napěťové zesílení $A_u = \frac{u_2}{u_1}$

napěťový zisk $a_u = 20 \log A_u$ [dB] **proudové zesílení** $A_i = \frac{i_2}{i_1}$

proudový zisk $a_i = 20 \log A_i$ [dB] **výkonové zesílení** $A_p = \frac{P_2}{P_1}$

výkonový zisk $a_p = 10 \log A_p$ [dB] [3]

nelineární zkreslení: Závislost mezi vstupním a výstupním proudem a napětím některých součástek použitých v zesilovači není lineární. [1] A proto, když na vstup zesilovače přivedeme budící signál sinusového průběhu, objeví se na jeho výstupu (kromě základní harmonické) i vyšší harmonické kmitočty. Průchodem dvou nebo více sinusových průběhů se v zesilovači objeví i jejich kombinační kmitočty. Tomuto jevu se souhrnně říká **nelineární zkreslení**.

druhy zkreslení: a) **Harmonické zkreslení** – při buzení např. sinusovým průběhem ($u = U \cdot \sin \omega t$) se na výstupu objeví řada vyšších harmonických ($U_1 \cdot \sin \omega t + U_2 \cdot \sin 2 \omega t + \dots$). [1]

b) **Amplitudové zkreslení** – způsobené nelinearitou zesilovacích součástek

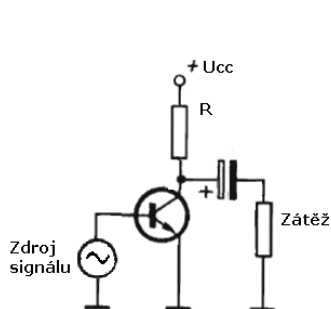
c) **Intermodulační zkreslení** – při současném průchodu více kmitočtů zesilovačem

d) **Zkreslení vyššími harmonickými síťového kmitočtu** – při nedokonalé filtraci je ss nap. napětí zesilovacích součástek doprovázeno zbytky síťového kmitočtu a jeho harmonickými

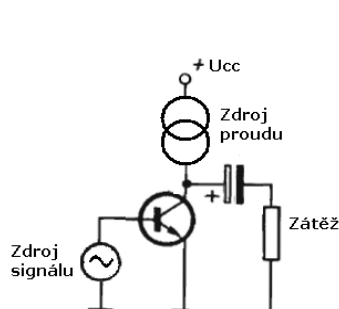
1.3 Třídy zesilovačů

Třídy zesilovačů můžeme dělit na základní – A, B, AB, C a ostatní (novější) – G, H, S, T, D. Zde však zaměříme pouze na základní, použitelné pro NF aplikace, tzn. A, B, AB.

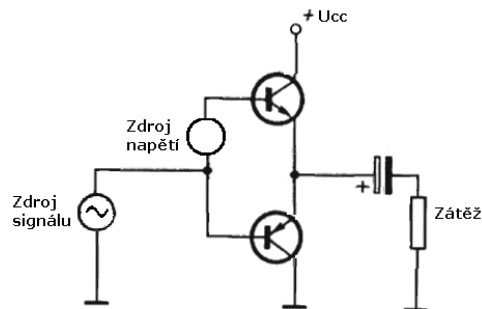
Třída A – tato třída je charakteristická tím, že úhel otevření aktivních součástek je 360° (2π), to znamená, že dané součástky jsou ve vodivém stavu po celou dobu periody. Díky tomu nevzniká tzv. přechodové zkreslení (u tříd B a AB ano), které obsahuje vyšší harmonické. Z toho plyne, že tato třída má ze všech základních tříd nejmenší zkreslení, ovšem na druhou stranu i velmi malou účinnost, způsobenou velkými klidovými proudy aktivních součástek. Tato účinnost však také závisí na způsobu zapojení koncového stupně. V jednočinném zapojení, při kterém je pracovní bod dán rezistorem (obr. 5a), je účinnost cca 12,5 %. Pokud nahradíme tento rezistor proudovým zdrojem (obr. 5b), můžeme zvýšit účinnost až na 25 %. U dvojčinného zapojení (obr. 5c) je pak teoretická účinnost až 50%.



Obrázek 5a



Obrázek 5b



Obrázek 5c

Třída B – u této třídy je úhel otevření aktivních součástek 180° (π), součástky tedy vedou jen jednu polovinu periody. Z toho vyplývá, že takové zesilovače má smysl stavět jen ve dvojčinném zapojení, kdy jedna aktivní součástka zpracovává jednu půlplnu signálu a druhá součástka druhou. Zesilovač třídy B má předpětí řídicí elektrody nastaveno tak, že bez buzení protéká zesilovačem zanedbatelně malý proud. [4] Z toho je patrná poměrně velká energetická účinnost (teoreticky $\pi/4$, což je zhruba 78.5 %, v praxi však bývá kolem 60 %). Ovšem nevýhodou je vznik přechodového zkreslení (které je u této třídy dobře slyšitelné), způsobené právě malými klidovými proudy.

Třída AB – vhodným nastavením polohy pracovního bodu lze zapojit zesilovač ve třídě AB, jejíž vlastnosti jsou v rozmezí, daném třídou A a B. [4] Tato třída se také nechá nazvat jistým kompromisem mezi těmito dvěma třídami. Úhel otevření aktivních součástek je mezi 180° a 360° . Při malých hodnotách budícího signálu pracuje zesilovač ve třídě A s malým zkreslením a malou účinností a při velkých změnách budícího signálu přechází do třídy B, kde má větší účinnost. [2] Zesilovače této třídy jsou v dnešní době asi nejrozšířenější.

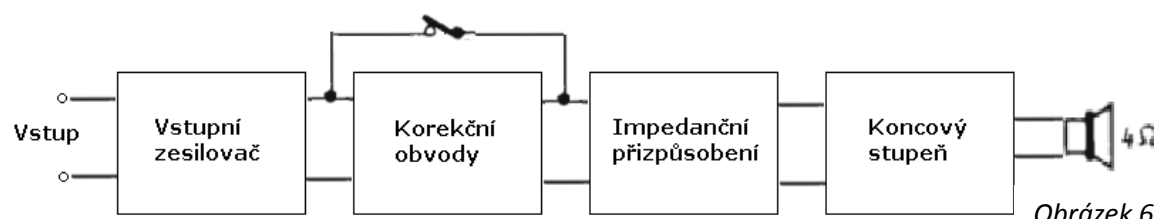
2 Popis vlastního zesilovače – Úvod

NF zesilovači zabývám už určitou dobu. A mým cílem bylo, když jsem se o ně začal zajímat, nastudovat si a pochopit něco z jejich teorie a následně na to, ze získaných poznatků, nějaký zesilovač sám navrhnout a postavit. Ovšem to jsem ještě nevěděl v jaké třídě bude pracovat a v tu chvíli mi na tom nezáleželo. Nicméně netrvalo dlouho a byl jsem rozhodnut, pustím se do zesilovače třídy A, s koncovým stupněm pracujícím v jednočinném zapojení. Protože schémata zesilovačů třídy B a AB je všude na internetu, ale i v literatuře mnoho. Ale zesilovače třídy A jsem nikde nenašel a když už ano, tak ten zesilovač pracoval dvojčinně nebo v něm byly použity elektronky a nebo unipolární tranzistory a to jsem nechtěl. Lákal mě především slibovaný perfektní zvuk, jaký každý této třídě přisuzuje. A díky tomu, že jsem nikde nenašel žádné schéma, které by mě zaujalo, rozhodl jsem se, že si takový zesilovač navrhnu sám.

První věcí, při návrhu jakéhokoli zařízení, je určení požadovaných parametrů (ovšem tyto parametry jsem během vývoje několikrát pozměnil):

- **vstupní odpor:** min. $10\text{ k}\Omega$
- **citlivost:** v rozmezí cca 200 mV až 350 mV
- **efektivní výstupní výkon:** alespoň $5\text{ W}/1\text{ kHz}$ do $4\text{ }\Omega$ zátěže
- **kmitočtová charakteristika:** 50 Hz (lépe 20 Hz) – 15 kHz v pásmu 3 dB
- rozumnou **účinnost** (v rámci možností jednočinné třídy A)

Druhým krokem bývá nakreslit přibližné blokové schéma:



Představa funkce: **Vstupní zesilovač** by měl zajistit požadovanou citlivost a také vstupní odpor. Měl by v něm být použit nějaký nízkošumový tranzistor, protože šumové vlastnosti zesilovače

závisí především na vlastnostech prvních zesilovacích stupňů (mají největší zesílení). **Korekční obvody** slouží pro úpravu kmitočtové charakteristiky zesilovače, v mém případě pro potlačení nebo zdůraznění hlubokých nebo vysokých tónů, ovšem jakákoli úprava vstupního signálu znamená vždy jeho zkreslení a proto jsem se rozhodl pro neobvyklou věc, přepínačem (na obrázku spínačem) budu moci kdykoli vyřadit korekce z provozu. **Impedanční přizpůsobení** jsem zařadil z předpokladu nutnosti, koncový stupeň bude mít jistě velmi malý vstupní odpor a tak malý výstupní odpor vstupního zesilovače a korekcí se mi asi nepodaří. Zapojením **koncového stupně** je dána třída, ve které bude zesilovač pracovat. V mém případě jednočinný ve třídě A. Bude výkonově zesilovat budící signál. Pro přehlednost není ve schématu kresleno napájení.

2.1 Koncový stupeň

Výpočet základních parametrů a hodnot:

Výstupní výkon (P_2): 5 W – později 14 W

zátěž (R_Z): 4 Ω

$$P_2 = 14W \Rightarrow U_{2ef} = \sqrt{P * R_Z} = \sqrt{14 * 4} = 7,48 V \sim - \text{efektivní hodnota stř. napětí na výstupu}$$

$$U_{2max} = 1,41 * U_{2ef} = \mathbf{10,54 V} \sim - \text{maximální hodnota střídavého napětí na výstupu}$$

$$I_{2ef} = \sqrt{\frac{P}{R_Z}} = \sqrt{\frac{14}{4}} = 1,87 A \sim - \text{efektivní hodnota proudu na výstupu}$$

$$I_{2max} = 1,41 * I_{2max} = 1,41 * 1,87 = \mathbf{2,63 A} \sim - \text{maximální hodnota střídavého proudu na výstupu}$$

Přibližné výpočty pro **koncový tranzistor**:

$U_{CE} = U_{2max} + U_{SAT} = 10,54 + 1 = 11,54 V$ pro jistotu **13 V** – napětí kolektor-emitor – většinou se volí v polovině napájecího napětí, takže **$U_{CC} = 26 V$**

$$I_C = 2,63 A \Rightarrow \mathbf{2,7 A} - \text{kolektorový proud}$$

$$\text{Tepelné zatížení tranzistoru: } P_T = U_{CE} * I_C = 13 * 2,7 = \mathbf{35,1 W}$$

$$\text{Odhadnuté } h_{21E} = 70 \Rightarrow I_B = \frac{I_C}{h_{21E}} = \frac{2,7}{70} = \mathbf{38 mA}$$

Koncový tranzistor:

$U_{CE} - 13 V$

$I_C - 2,7 A$

$I_B - 38 mA$

$h_{21E} - 70$

$P_C - 35,1 W$

$\Rightarrow$ Zvolil jsem tranzistor **KD607:** **$U_{CE0} = 80 V$**

(mezní hodnoty)

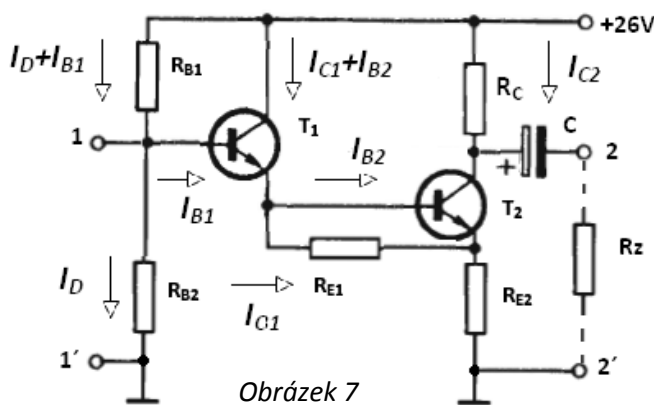
$I_C = 10 A$

$I_B = 2 A$

$$h_{21E} > 30 \text{ při } U_{CB} = 2V, I_C = 1 A$$

$$P_{tot} = 70 W$$

2.1.1 První návrh



Obrázek 7

Takto vypadalo první schéma koncového stupně, co jsem vymyslel a které jsem dále zdokonaloval. A myslím, že i když byly později provedené změny značné, je vhodné jej trochu popsat.

Rozhodl jsem se pro dvoustupňový koncový stupeň s darlingtonovo

zapojením tranzistorů. To je vhodné zejména tam, kde požadujeme velké proudové zesílení (h_{21e} celkové = $h_{21eT1} * h_{21eT2}$). Díky tomu může mít zapojení malý výstupní a vysoký vstupní odpor. Kolektor T_1 je zapojen přímo na napájecí napětí, aby se zamezilo Millerovu efektu. Rezistor R_{E1} zvyšuje kolektorový proud tranzistoru T_1 o proud I_{C1} , protékající tímto rezistorem a tím roste i je

strmost, ovšem klesá vstupní odpor. Jeho hodnotu jsem stanovil: $R_{E1} = \frac{U_{BE2}}{I_{C1}} = \frac{0,5}{0,03} = 16,6 \Omega$ -

hodnotu U_{BE2} jsem (kvůli velkému rozptylu parametrů tranzistorů) zvolil odhadem a proud 30 mA jsem zvolil o něco menší než proud báze T_2 (38 mA). Rezistor R_{E2} jsem původně zamýšlel jako snímací rezistor pro ochranu koncového stupně proti přetížení, ovšem od tohoto nápadu jsem upustil, ale rezistor zůstal, jeho hodnotu jsem stanovil na **110 mΩ**. Při kolektorovém proudu 2,7 A by na tomto rezistoru byl úbytek napětí $U_{RE2} = R_{E2} * I_{C2} = 0,297 V$. Když by tento úbytek byl větší, otevřel by tranzistor nebo diodu a ty by snížily bázevý proud tranzistoru T_1 . Rezistor R_C jsem zvolil **4 Ω**, protože zjednodušeně řečeno – kolektorový odpor tranzistoru se rovná jeho výstupnímu odporu. A když $R_C = 4 \Omega$, tak $U_{RC} = U_{CC} - U_{CE2} - U_{RE2} = 12,7 V$. Ovšem tento výpočet ovlivní

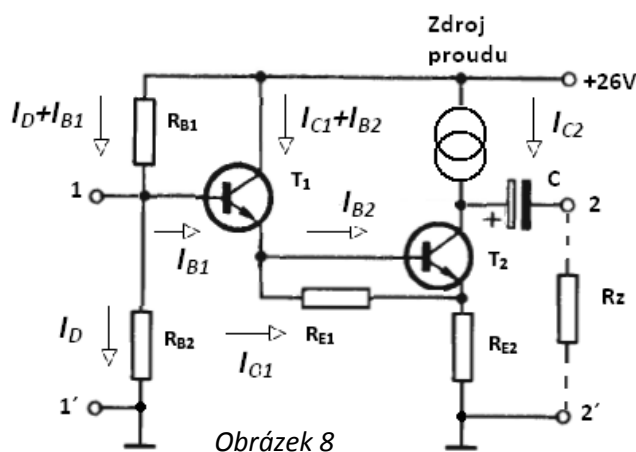
kolektorový proud druhého tranzistoru: $I_{C2} = \frac{U_{RC}}{R_C} = \frac{12,7}{4} = 3,17 A$. Tak jsem byl nucen zvětšit

kolektorový proud T_2 . Nyní je ztrátový tepelný výkon odevzdávaný tranzistorem = 41,2 W a výkon odevzdávaný rezistorem $R_C = 40,25 W$ a $R_{E2} = 1,1 W$, dohromady = **82,55 W**.

Nicméně, efektivní výkon, který byl takto zapojený zesilovač schopen, s rozumným zkreslením, dodat do 4 ohmové zátěže byl pouze **7 W**! Z čehož vychází účinnost $\eta = \frac{7}{82,55} * 100 = \underline{\underline{8,47\%}}$.

Proto jsem se rozhodl nahradit R_C proudovým zdrojem.

2.1.2 Proudový zdroj

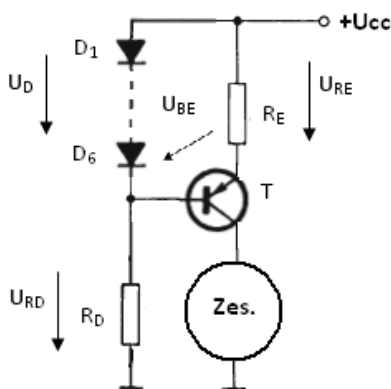


Obrázek 8

Použitím zdroje proudu jsem mohl snížit proud kolektoru T_2 zpět na 2,7 A a tím i snížit celkový příkon. Zdroje proudu jsou charakteristické tím, že na svém výstupu udržují stále stejný (konstantní) proud, bez ohledu na velikost zátěže (tedy do určité meze, takové, aby úbytek napětí na zátěži nepřesáhl maximální napětí, tzn. napětí napájecího zdroje minus napětí na

zdroji proudu), tím pádem odpadá starost o výstupní odpor zesilovače a zároveň zdroj proudu působí jako ochranu proti zkratu na výstupních svorkách zesilovače.

Zdroj proudu jsem zvolil jednoduchý, s jedním tranzistorem:



Obrázek 9

Diody D_1 až D_6 udržují na přechodu B-E tranzistoru T konstantní napětí a tím pak teče konstantní proud, tento proud je následně tranzistorem zesílen skoro na konstantní hodnotu proudu (I_C). Rezistor R_D slouží pro nastavení proudu tekoucího diodami (tento proud by měl být takový, aby se diody otevřely, takže nesmí být příliš malý, velký proud nevadí, pokud se nebude překračovat mezní proud diod, ale je nesmyslné nastavovat ho příliš velký, kvůli zbytečnému

příkonu navíc). Rezistor R_E určuje stabilizovaný proud. $R_E = \frac{U_D - U_{BE}}{I_C}$ (správně by mělo být místo I_C psáno I_E , protože tímto rezistorem teče také bázev proud T , $I_E = I_C + I_B$, ale proud I_B je proti I_C zanedbatelně malý a pro zjednodušení je možno počítat bez něj). Z toho $I_C = \frac{U_D - U_{BE}}{R_E}$. Konkrétně

pro můj příklad: nejdříve vysvětlení proč tolik obyčejných diod pro předpětí báze tranzistoru? Lze použít jednu zenerovu diodu se stejným napětím, jaké dají dohromady tyto diody, ovšem zenerových diod jsem měl doma málo a obyčejných mnoho, proto jsem využil 6 obyčejných

usměrňovacích diod. Na každé diodě bude úbytek napětí zhruba 0,6 V, tj. $0,6 \cdot 6 = 3,6 \text{ V}$, úbytek napětí na přechodu B-E tranzistoru bude také zhruba **0,6 V** => můžeme vypočítat $R_E = \frac{3,6 - 0,6}{2,7} =$

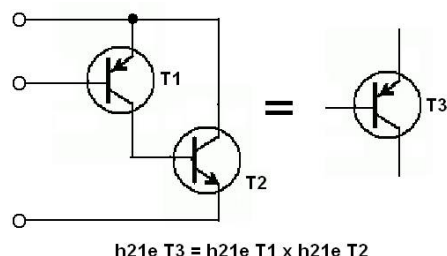
1,1 Ω . Dále tepelný příkon rezistoru: $P_{RE} = U_{RE} \cdot I_C = 3 \cdot 2,7 = \mathbf{8,1 \text{ W}}$.

2.1.3 Výsledné řešení

Proud tekoucí rezistorem R_D jsem stanovil na 1mA (později na 1,6mA). Z toho $R_D = \frac{U_{CC} - U_D}{I_D} =$

$\frac{26 - 3,6}{0,001} = \mathbf{22,4 \text{ k}\Omega}$ (později 18 k Ω). Také můžeme přibližně vypočítat tepelnou ztrátu tranzistoru P_T

$= (U_{CC} - U_{RE} - U_{zesilovače}) \cdot I_C = 10 \cdot 2,7 = \mathbf{27 \text{ W}}$. Ve schématu je použit tranzistor PNP, ovšem výkonové

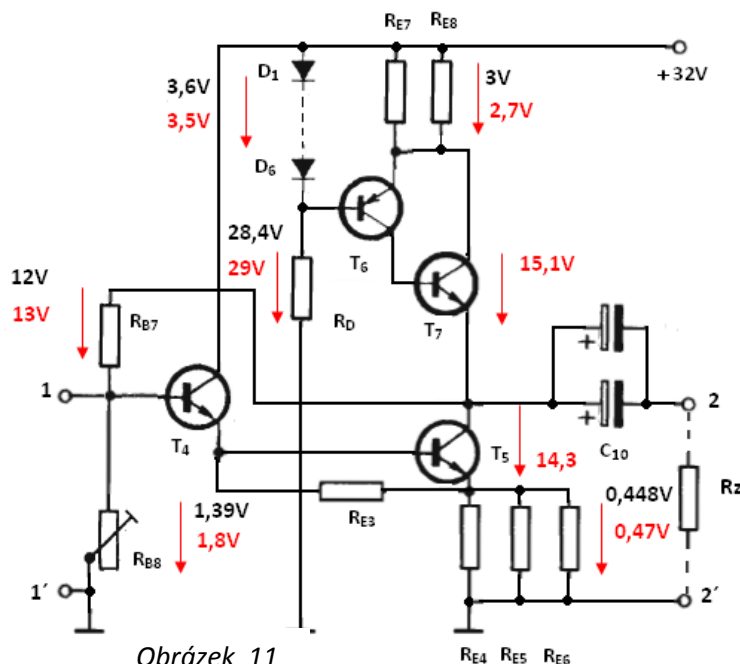


Obrázek 10

tranzistory typu PNP nejsou příliš běžné a proto je možno vyrobit jeho náhradu. Podle internetu [5] je tento tranzistor možné složit ze dvou: první je **malovýkonový PNP** a druhý je **výkonový NPN**. Tato sestava odpovídá výkonovému tranzistoru PNP. Na místo tranzistoru T_1

jsem použil typ **KF517**, tranzistor T_2 jsem zvolil **KD607**

(opět podle výkonové ztráty a kolektorového proudu).



Obrázek 11

Konečná verze: Na obr. 11 je konečné schéma, které jsem realizoval. Ve schématu jsou také vyznačeny hodnoty napětí (černě jsou vypočtené a červeně jsou skutečně naměřené). Také jsem změnil označení součástek do konečné podoby. některé z výpočtů jsou v předchozí části, takže nyní pouze doplním chybějící.

Napájecí napětí jsem zvětšil

z původních 26 V na 32 V, aby na obou tranzistorech T_5 i T_7 bylo přibližně stejné napětí, kvůli maximálnímu možnému rozkmitu střídavého napětí. Do emitoru T_6 a kolektoru T_7 jsem zapojil místo jednoho rezistoru dva, pro jejich menší tepelné namáhání. Při paralelním spojování

rezistorů je výsledný odpor menší, než odpor rezistoru s nejmenší hodnotou. Potřebná hodnota byla 1,1 Ω. Podle vzorce pro paralelní spojování rezistorů: $R = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$ jsem použil **dva stejné rezistory 2,2 Ω/6 W** (R_{E7} , R_{E8}).

Rezistor R_D jsem zmenšil z 22 kΩ na 18 kΩ a proud, který jím teče se zároveň díky zvětšení nap. napětí, zvětšil: $\frac{32 - 3,6}{18000} = 1,6 \text{ mA}$. Proud tekoucí do báze T_6 je podle měření 770 μA (z toho lze

určit celkové proudové zesílení $T_6 + T_7 = \frac{I_{CT7}}{I_{BT6}} = \frac{2,7}{0,00077} = \mathbf{3506}$. Z toho je celkový proud tekoucí

diodami D_1 až D_6 cca $I_{RD} + I_{BT6} = 1,6 + 0,77 = \mathbf{2,37 \text{ mA}}$.

Tranzistor T_5 jsem také opatřil více emitorovými rezistory, také kvůli jejich menšímu tepelnému namáhání. Na místo 1x 110 mΩ, jsem použil 3x 500 mΩ/1 W. Což vychází na přibližný celkový odpor 166 mΩ, je to více než původně určený, ovšem to vůbec nevadí. Úbytek napětí na nich = $R_E * I_C = 0,166 * 2,7 = \mathbf{0,448 \text{ V}}$, ztrátový výkon jimi spotřebovaný = $U_{RE} * I_C = \mathbf{1,2 \text{ W}}$. Pro rezistor R_{E3} jsem nechal původní hodnotu: 16,6 Ω. Tranzistor T_4 bylo nutno vybrat podle kritérií: $U_{CE} =$ cca 30 V, $I_C =$ cca 68 mA, $P_C = 2 \text{ W}$. Původně jsem zvolil tranzistor KF506, ten je kvalitní, má poměrně vysoké h_{21e} i h_{21E} , ovšem kvůli jeho maximální přípustné kolektorové ztrátě (2,6 W), jsem raději zvolil jiný typ: spínací tranzistor KU612, ten nemá (při nastavení stejného pracovního bodu) tak vysoké zesílení, ovšem má povolenou větší kolektorovou ztrátu (10 W). Změřil jsem si potřebný bázev proud T_4 (2 mA) a podle něho vypočetl hodnoty rezistorů pro dělič napětí u jeho báze. Proud děličem (I_D) jsem zvolil pouze 2x vyšší než proud báze, tj. 4 mA.

$R_{B8} = \frac{U_{BET4} + U_{BET5} + U_{RE4,5,6}}{I_D} = \frac{0,5 + 0,5 + 0,448}{0,004} = 362 \Omega$ (zvolil jsem **trimr 1 kΩ** pro možnost

lepšího nastavení pracovního bodu). Rezistor R_{B7} jsem nakonec nezapojil přímo na napájecí napětí, ale na kolektor T_5 , resp. emitor T_7 , kvůli lepší teplotní stabilizaci pracovního bodu T_5 a T_4

(zavedena záporná zpětná vazba). $R_{B7} = \frac{U_{CC} - U_{RE7,8} - U_{CET7} - U_{RB8}}{I_D + I_{BT4}} = \frac{32 - 3 - 14 - 1,448}{0,004 + 0,002} = 2\,300 \Omega$

(z řady E12 jsem vybral rezistor 2k2). Výstupní kondenzátory jsem počítal pro dolní mezní

kmitočet $f_d = 20 \text{ Hz}$, podle: $C = \frac{1}{2\pi * f_d * R_z}$, pro $R_z = 4 \Omega$. Vychází minimální hodnota **1,9 mF**, pro

jistotu jsem použil kondenzátory **2 mF + 470 μF**.

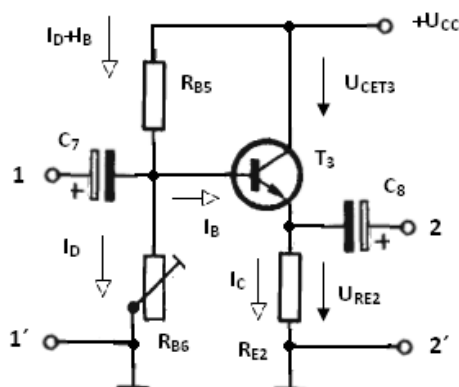
Vstupní odpor zesilovače je podle měření cca **71 Ω**. Maximální napětí na výstupu: **7,9 V/800 Hz** – při zkreslení **2 %**, citlivost je **395 mV**, tj. napěťové zesílení: **$A_u = 19,87$** = cca **26 dB**, výst. proud:

1,96 A, vstupní proud: 5,5 mA, $A_i = 356 = 51 \text{ dB}$, vstup. výkon: 2,17 mW, výst. výkon: 15,6 W, $A_p = 7189$

2.2 Předzesilovač – Impedanční přizpůsobení

I přes darlingtonovo zapojení tranzistorů koncového stupně, má koncový stupeň velmi malý vstupní odpor, proto bylo potřeba jeho impedanci nějak zvětšit, aby samotný předzesilovač nemusel pracovat s velkými proudy (kolektorový, bázeový) a nevznikal v něm příliš velký šum.

Parametry tohoto stupně by měly být přibližně takové: $R_{výst} = 232 \Omega$ (protože, před tím, než jsem zavedl napěťovou zápornou zpětnou vazbu v koncovém stupni (R_{B7} na kolektor T_5), byl vstupní odpor zesilovače 232Ω , ovšem pracovní bod T_5 byl příliš nestabilní, proto jsem změnil zapojení koncového stupně, ale tento stupeň už takto zapojen zůstal). $U_{výst} = 395 \text{ mV}$, $I_{výst} =$ původně 1,7 mA, na vstupní impedanci nezáleželo, poněvadž na dalších stupních jsem teprve pracoval.



Obrázek 12

hodnota proudového zesilovacího činitele největší. Bývá to při $U_{CE} = 2$ až 5 V a při $I_C = 1$ až 3 mA . [3] U většiny tranzistorů závisí míra šumu i na poloze pracovního bodu. Minimální hodnoty šumu jsou zpravidla pro $U_{CE} = 1$ až 2 V a $I_C = 1$ až 2 mA . [3] Tento článek jsem bral v úvahu při návrhu celého předzesilovače.

Hodnota rezistoru R_{E2} tvoří výstupní odpor celého stupně, proto $R_{E2} = 232 \Omega$. Pracovní bod tranzistoru pro třídu A se volí v polovině napájecího napětí, tzn. $6/2 = 3 \text{ V} = U_{CE3} = U_{RE2}$. Z toho

proud $I_C = \frac{U_{RE2}}{R_{E2}} = \frac{3}{232} = 13 \text{ mA}$. Odhadem h_{21E} tranzistoru = 250. Z toho lze vypočítat proud báze

tranzistoru: $I_B = \frac{I_C}{h_{21E}} = \frac{0,013}{250} = 52 \mu\text{A}$. Proud I_D děličem napětí R_{B5} a R_{B6} jsem zvolil 2x větší tzn.

104 μA . Z toho lze vypočítat tyto rezistory: $R_{B5} = \frac{U_{CC} - U_{BE3} - U_{RE2}}{I_D + I_B} = \frac{6 - 0,6 - 3}{0,000104 + 0,000052} =$

$15\,384\,\Omega$ (z řady E12, rezistor **15 k Ω**). Rezistor $R_{B6} = \frac{U_{BE3} + U_{RE2}}{I_D} = \frac{0,6 + 3}{0,000104} = 34\,615\,\Omega$ (**trimr**

47 k Ω). Nyní lze vypočíst **vstupní odpor**: $h_{21e} * R_{E2} || (R_{B5} || R_{B6}) = \text{cca } 250 * 232 || (15\text{k} || 34\text{k}) =$
8 900 Ω

Dle následného měření: **10 k Ω** . Kondenzátory C_7 a C_8 nyní také lze vypočítat: $C_7 = \frac{1}{2\pi * f_d * R}$ (R

je myšlena paralelní kombinace vstupního odporu tohoto stupně a výstupní odpor předcházejícího stupně), když je vstupní odpor 10 k Ω , tak předcházející stupeň budu navrhovat

s předpokladem pro jeho výstupní impedanci 10 k $\Omega \Rightarrow R = 5\text{ k}\Omega \Rightarrow C_7 = \frac{1}{2\pi * 20 * 5000} = 1,6\,\mu\text{F}$ (

pro jistotu **4,7 μF**). $C_8 = \frac{1}{2\pi * f_d * R}$ (R je cca 100 Ω) = $\frac{1}{2\pi * 20 * 100} = 79\,\mu\text{F}$ (pro jistotu **220 μF**).

Tranzistor – **KC508**

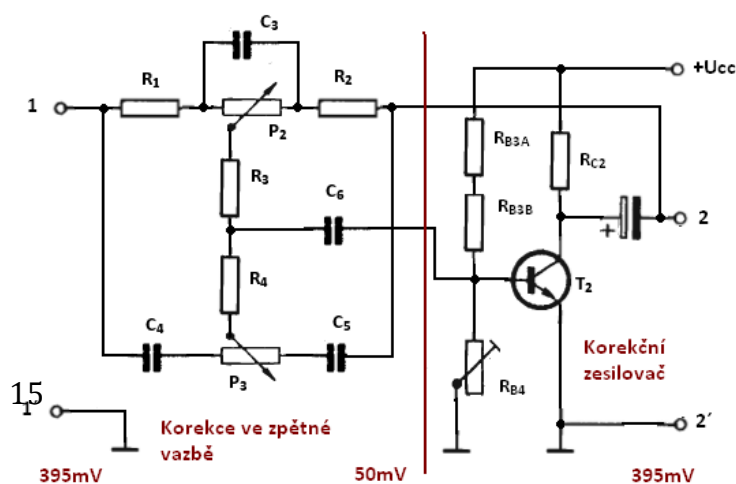
Vstupní odpor stupně je podle měření cca **10 k Ω** . Napěťové zesílení: **A_u je zaokrouhleně 1 = cca 0dB**, výst. proud: **3,95 mA**, vstupní proud: **39,5 μA** , **$A_i = 100 = 40\text{ dB}$** , vstup. výkon: **15,6 μW** , výst. výkon: **1,56 mW**

2.2.1 Korekční zesilovač

Po zhotovení obvodu impedančního přizpůsobení, stanul přišel na řadu zajímavý úkol. Bylo třeba navrhnout dva zbývající stupně za dodržení, toho, že oba dva budou mít stejný výstupní odpor a navíc ještě s tím, že korekční zesilovač bude mít stejný i vstupní odpor. Protože jsem chtěl mít možnost korekce kdykoli vyřadit ze signálové cesty, musel mít i vstupní zesilovač stejný výstupní odpor jako korekční. A ještě korekční zesilovač musel mít napěťové zesílení takové, aby se jeho vstupní napětí rovnalo jeho výstupnímu. Proto, aby když se korekce vyřadí, zesilovač

zesiloval budící signál se stále stejným zesílením.

Se svým návrhem korekčního zesilovače jsem však spokojen nebyl, a proto jsem se rozhodl použít schéma korekci



Obrázek 13

z gramofonu Tesla NZC 431 a pouze upravit pracovní bod použitého korekčního tranzistoru (T_2). Hodnoty součástek použitých v korekcích budou přiloženy v přílohách. Korekce jsem zkušebně sestavil, abych zjistil jejich

2.2.2 Korekce + parametry tranzistoru KC508

parametry, především jaký způsobují útlum napětí užitečného signálu. Na vstup jsem přivedl potřebné napětí, 395 mV, a měřil napětí na výstupu. Naměřil jsem 50 mV, tj. útlum 18 dB. Abych se na výstupu dostal na původní hodnotu napětí, musel jsem udělat zesilovač, který bude mít napěťové zesílení 18 dB, tj. 7,9. Napájecí napětí jsem ponechal stejné jako u následujícího stupně: 6 V. Rezistor R_{C2} jsem pro výstupní odpor zvolil 10 k Ω . Napětí U_{CE2} jsem opět zvolil v polovině napájecího napětí, tj. $6/2 = 3$ V $\Rightarrow U_{RC2} = 3$ V. Z toho lze určit $I_{C2} = \frac{U_{RC2}}{R_{C2}} = \frac{3}{10000} = 300 \mu A$. Činitel

h_{21E} jsem opět odhadl na **250**. Proud báze $I_B = \frac{I_C}{h_{21E}} = \frac{0,0003}{250} = 1,2 \mu A$. Proud děličem napětí u

báze jsem stanovil na **12 μA** , tj. 10x větší než bázový. Z toho lze vypočítat rezistory

$$R_{B3} = \frac{U_{CC} - U_{BE2}}{I_D + I_B} = \frac{6 - 0,6}{0,000012 + 0,000012} = 409 \text{ k}\Omega \text{ (rozděleno na dva rezistory: M18+M22)}.$$

$$\text{Rezistor } R_{B4} = \frac{U_{BE}}{I_D} = \frac{0,6}{0,000012} = 50 \text{ k}\Omega \text{ (trimr M1)}. \text{ Nyní jsem tento stupeň zapojil a odměřil,}$$

čekal jsem, že zesílení tranzistoru bude moc velké nebo moc malé a že budu muset zavést zpětnou vazbu nebo přidělat další stupeň, abych to vykompenzoval. K mému překvapení, bylo na výstupu tranzistoru přesně takové napětí, jaké jsem potřeboval (cca **395 mV**), tak jsem byl rád. Ovšem ještě více k nevíře je fakt, že i **vstupní odpor** tohoto stupně se ukázal po změření **10,6 k Ω** ! Čekal jsem, že tento odpor také nebude sedět (řádově ano, díky rezistorům u báze tranzistoru), ale nevěděl jsem, co přesně udělá zpětná vazba. Díky tomu jsem s tímto stupněm mohl skončit a věnovat se poslednímu, respektive prvnímu stupni. Výstupní kondenzátor, ve schématu bez označení, je C_7 . Tranzistor jsem použil typ **KC508**.

Parametry tranzistoru KC508 (výběr parametrů):

Mezní hodnoty:

Závěrné napětí kolektoru	U_{CE}	-	20 V
Proud kolektoru			
trvalý	I_C	-	100 mA
Ztrátový výkon kolektoru			
bez chlazení	P_C	-	300 mW

Charakteristické údaje:

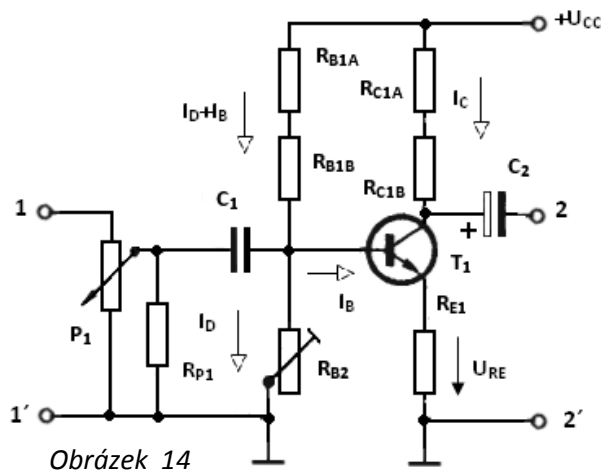
Zesilovací činitel

($U_{CB} = 5 \text{ V}$, $I_E = 2 \text{ mA}$, $f = 1 \text{ kHz}$) h_{21E} 125.....900

2.2.3 Vstupní zesilovač

Vlastnosti vstupního zesilovače jsou rozhodující pro kvalitu celého zesilovače. Pokud bude mít velký šum, bude tento šum zesilován všemi dalšími stupni, také napájecí napětí musí mít velmi kvalitně vyfiltrované, aby se nepřenesl brum vzniklý nedokonalou filtrací napájecího napětí. Proto například u koncového stupně jsou kladeny mnohem menší nároky na filtraci napájecího napětí (koncový stupeň má většinou malé napěťové zesílení a pracuje s mnohem většími napájecími napětími, vzniklý brum nebo šum o malé úrovni proto zesílí jen nepatrně) než v předzesilovači. Pro předpoklad práce s malými napětími, proudy i výkony jsem rovnou zvolil tranzistor. Nízkošumový s velkým proudovým zesílením, typu KC148. V podstatě jde o stejný tranzistor jako je KC508, akorát že má jiné pouzdro. Toto pouzdro je plastové na rozdíl od kovového KC508, uvažoval jsem

takto, abych tento tranzistor mohl obalit vodivou, kovovou sítkou (tu spojit se zemí) a tím tranzistor dokonale odstínit. KC508 má kovové pouzdro vodivě spojené s kolektorem a obalení vodivým materiálem by tedy nebylo možné.



Obrázek 14

Pro vstupní zesilovač jsem zvolil zapojení tranzistoru se společným emitorem. Jeho úkolem bylo zajistit požadovanou citlivost celého zesilovače. Napájecí napětí je opět 6 V. Citlivost jsem si nakonec zvolil 200 mV. A mohl jsem počítat: když bude $\sim U_{RC} = 395 \text{ mV}$, tak $U_{RE} = 200 \text{ mV}$ (U_{BE} jsem zde, pro snazší výpočet, zanedbal). Dále jsem si řekl $I_C = I_E$

(proud I_B jsem zanedbal). Řekl jsem si, $R_C + R_E = 10 \text{ k}\Omega$. $U_{CE} = 6/2 = 3 \text{ V}$, $U_{RC} + U_{RE} = 3 \text{ V}$ Z toho

$$I_C = \frac{U_{RC} + U_{RE}}{R_C + R_E} = 300 \mu\text{A}. \quad h_{21E} \text{ tranzistoru: cca } 250. \quad \text{Z toho } I_B = \frac{I_C}{h_{21E}} = 1,2 \mu\text{A}. \quad A_u = \frac{U_2}{U_1} \text{ lze psát}$$

$$A_u = \frac{U_{RC}}{U_{RE}} = \frac{0,395}{0,2} = 1,97. \quad \text{Tranzistor tedy musí mít napěťové zesílení } 1,97. \quad \text{Pro zjednodušení lze}$$

$$\text{tedy odvodit vztah: } \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_Z'}{R_E}, \quad \text{kde } R_Z' = \frac{R_Z * R_C}{R_Z + R_C}, \quad R_C \text{ bude hodnotou blízko } 10 \text{ k}\Omega \text{ (zvolil jsem } 7\text{k}8$$

$$-2k2 + 5k6), R_z' = \frac{10000 * 7800}{10000 + 7800} = 4\,382\text{ k}\Omega, \text{ z toho } R_E = \frac{4382}{1,97} = 2\,224\text{ k}\Omega \text{ (z řady E12 - 2k2). Tímto}$$

lze určit, jaké bude stejnosměrné napětí na kolektorovém rezistoru $U_{RC1} = R_{C1} * I_C = 7\,800 * 0,0003 = 2,34\text{ V}$ a $U_{RE1} = R_{E1} * I_C = 2\,200 * 0,0003 = 0,66\text{ V}$. Rezistory v bázi T_1 : proud, tekoucí děličem napětí jsem zvolil

2.2.4 Regulátor hlasitosti

$$4x \text{ větší než proud báze, tj. } 4,8\text{ }\mu\text{A. } R_{B1} = \frac{U_{CC} - U_{BE1} - U_{RE1}}{I_D + I_B} = \frac{6 - 0,6 - 0,66}{0,000006} = 790\text{ k}\Omega \text{ (z řady}$$

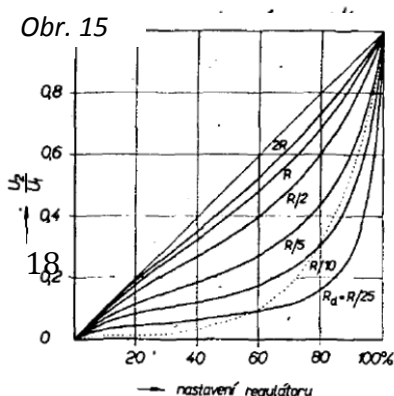
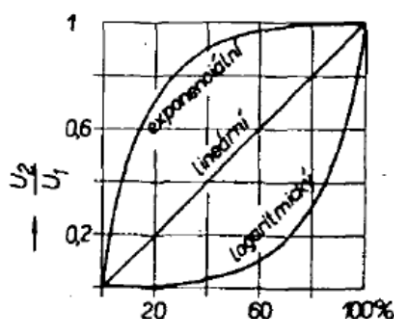
$$\text{E12 270k+M5), } R_{B2} = \frac{U_{BE} + U_{RE}}{I_D} = \frac{0,6 + 0,66}{0,0000048} = 262\text{ k}\Omega \text{ (trimr 1M5). Kondenzátor}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi * f_d * R} \text{ (R je paralelní kombinace výstupního odporu tohoto stupně a vstupního odporu}$$

$$\text{následujícího stupně) = } \frac{1}{2\pi * 20 * 4382} = 1,8\text{ }\mu\text{F (raději 2,2 }\mu\text{F). Změřený vstupní odpor stupně je}$$

$$131\text{ k}\Omega. \text{ Z toho kondenzátor } C_1 = \frac{1}{2\pi * f_d * R} \text{ (R = } R_{vst} \parallel R_{P1}, \text{ - odhadem cca 50 k}\Omega) = 159\text{ nF (raději}$$

220 nF). Tímto byl vlastní zesilovač téměř hotov. Ještě byl potřeba regulátor hlasitosti. Jako regulátor hlasitosti se nejčastěji používá potenciometr. Tento *potenciometr má plynule regulovat odpor v rozsahu nejméně 1:300, tj. 50dB, a má mít logaritmický průběh, aby jeho stupnice byla v decibelovém měřítku rovnoměrná. Odpor potenciometru nesmí být příliš velký, jinak by spolu se vstupní kapacitou následující elektronky působil pokles vysokých kmitočtů.* [7] Kapacita nemusí být pouze elektronky, ale i tranzistoru. Maximální hodnotu potenciometru lze určit ze vztahu $\frac{R_i + \rho}{4} =$

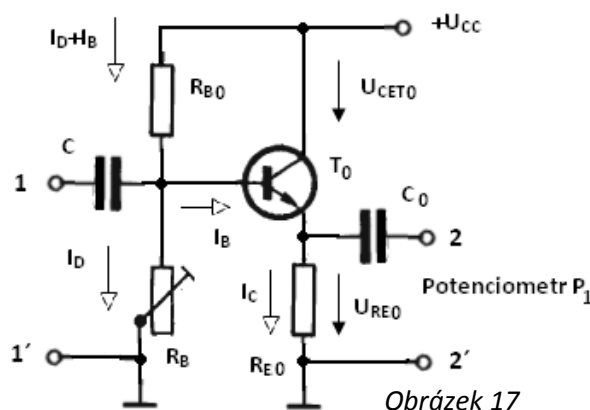


R_{vst} [7] (R_i je odpor zdroje signálu, R_{vst} je vstupní odpor zesilovače, ρ je odpor potenciometru, který lze snadno vyjádřit.) Já jsem jeho maximální hodnotu také vypočetl, cca 400 k Ω . Ovšem potenciometr s logaritmickým průběhem jsem doma nenašel. V AR [6] jsem však objevil zajímavý článek, seznamující s možnými úpravami průběhů potenciometrů s lineárním průběhem. Na obrázku 15 – ideální průběhy potenciometrů. Potřebný logaritmický průběh získáme připojením paralelního rezistoru k dolní větvi lineárního potenciometru. Velikost rezistoru určíme z obrázku 16 (kde R je

odpor upravovaného potenciometru). Exponenciálního průběhu dosáhneme použitím rezistoru v horní větvi. Nevýhoda takovýchto úprav spočívá v tom, že celkový odpor potenciometru se mění s polohou jeho jezdce (graf v přílohách). Já zvolil potenciometr 250k/N a k němu rezistor 100 kΩ, tj. průběh R/2,5. Nižší hodnoty rezistoru není dobré volit, z důvodu zachování relativně vysokého vstupního odporu.

2.2.5 Vstupní impedanční zesilovač

Vstupní impedanční zesilovač je skutečně první stupeň v celém zesilovači. S jeho zařazením do své konstrukce jsem nepočítal, proto ani není na straně 12 zakreslen v blokovém schématu. Z výsledků měření vstupního odporu celého zesilovače bez tohoto bloku, jsem zjistil, že vstupní odpor se díky úpravě lineárního potenciometru na logaritmický výrazně mění. A to v rozsahu od **139 kΩ** do **33 kΩ**, v závislosti na poloze jezdce potenciometru. Při maximální hlasitosti byl vstupní odpor již zmiňovaných 33 kΩ a to je poněkud málo, a to jak z důvodu co největší univerzálnosti zesilovače, ale také proto, že malý vstupní odpor může znamenat více šumu, větší zkreslení, atd. Protože jak jsem již na začátku psal, nejlépe je když se výstupní odpor jednoho stupně rovná vstupnímu odporu následujícího, a pro zdroj signálu a zesilovač platí to samé. Ovšem, když se tento stav nepodaří, je lépe, aby byl vstupní odpor jednoho stupně vyšší než výstupní předchozího. A 33 kΩ je velká zátěž pro zdroje signálu s výstupním odporem např.: 300 kΩ.



Tento stupeň má pouze zajistit vyšší vstupní odpor zesilovače. Jelikož bude mít tento tranzistor na vstup připojen budící signál bez jakéhokoli regulátoru, zvolil jsem napájecí napětí vyšší než u předchozích stupňů, tj. 12 V, a to pro možnost velkého rozkmitu budícího signálu, aby nedocházelo k přebuzení použitého tranzistoru. Rezistor

RE0 jsem zvolil 47 kΩ, je to přibližně střední hodnota vstupního odporu následujícího stupně.

Napětí UCE jsem zvolil v polovině napájecího, tj. $12/2 = 6 \text{ V} = U_{RE0}$. Nyní můžeme spočítat proud $I_C =$

$$\frac{U_{RE0}}{R_{E0}} = \frac{6}{47000} = 127 \text{ } \mu\text{A}. \text{ } h_{21E} \text{ } T_0 \text{ jsem opět odhadl na } 250. \text{ Z toho proud } I_B = \frac{I_C}{h_{21E}} = \frac{0,000127}{250} =$$

500 nA. Nyní je vstupní odpor zesilovače cca $h_{21e} * R_{E0} = \mathbf{11,75 \text{ M}\Omega}$. To je však příliš vysoká hodnota. Je potřeba ji zmenšit rezistory RB a RB0 a tím zároveň i stabilizovat pracovní bod

$$\text{tranzistoru. Prou } I_D \text{ děličem } I_D \text{ je } 10\times \text{ větší než } I_B \text{ (} 5 \text{ } \mu\text{A}). \text{ } R_B = \frac{U_{BE} + U_{RE0}}{I_D} = \frac{0,6 + 6}{0,000005} = 1,32 \text{ M}\Omega$$

(trimr $1 \text{ M}\Omega + R = 1 \text{ M}\Omega$). $R_{B0} = \frac{U_{CC} - U_{RB}}{I_D + I_B} = 981 \text{ k}\Omega$ (rezistor $1 \text{ M}\Omega$). Kondenzátory $C =$

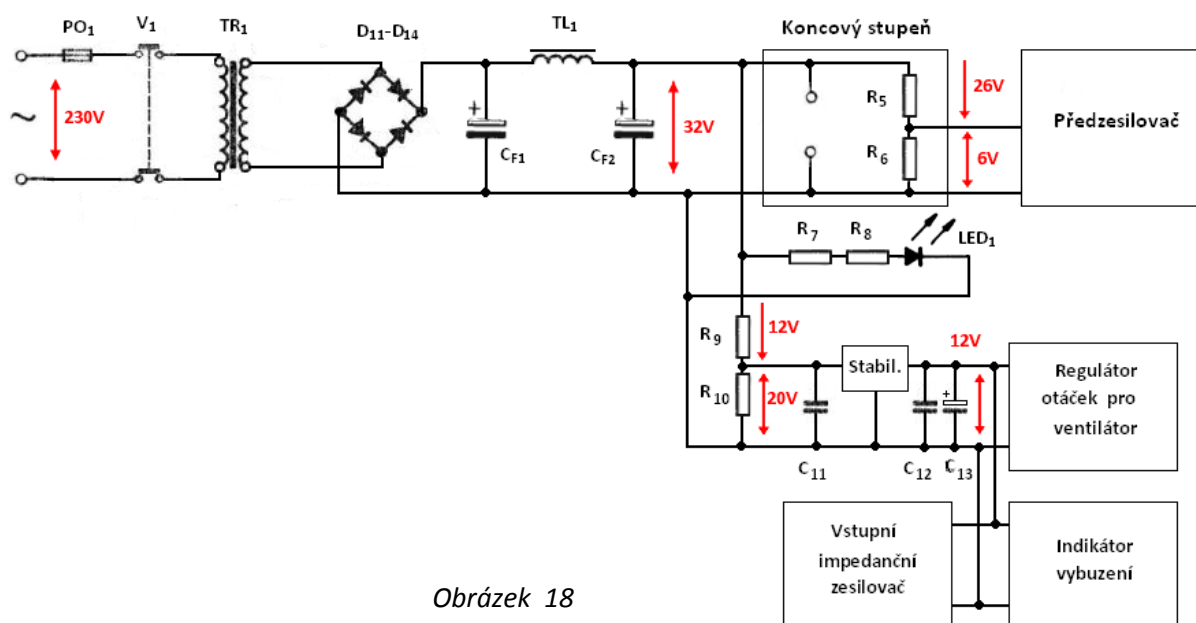
$\frac{1}{2\pi * f_d * R}$ ($R = \text{cca } 200 \text{ k}\Omega$) = min 40 nF (raději 150 nF) $C_0 = 1 \text{ }\mu\text{F}$. Nyní sice nepatrně klesla

citlivost, emitorový sledovač má napěťové zesílení vždy menší než 1, ale výrazně se zvýšil **vstupní odpor: $524 \text{ k}\Omega$** . Tranzistor je typ **KC508**.

2.3 Napájecí zdroj

Napájecí zdroj je opět velmi podstatná část nejenom všech zesilovačů, ale každého elektronického zařízení. A v různých zařízeních jsou také kladeny různé nároky. NF zesilovače se řadí do skupiny zařízení s vysokými nároky, obzvláště zesilovače pracující s velkými výstupními výkony nebo zesilovače určené k zesilování velmi slabých signálů. Zdroje pro taková zařízení musí mít na svém výstupu co nejméně zvlněné výstupní stejnosměrné napětí, tzn. dokonale filtrované a dostatečně tvrdé (to ovšem zcela neplatí u zesilovačů třídy A). V dnešní době existují kromě základní koncepce napájecích zdrojů také zdroje spínané. Ty mají oproti klasickým výhody, např.: není potřeba velkých, drahých a těžkých transformátorů pro velké výkony. Nevýhody: obsahují obrovské množství součástek => větší šance na poruchu, vyžadují opravdu kvalitní součástky, při chodu naprázdno se mohou poškodit.

Já jsem pro svůj zesilovač zvolil napájecí zdroj klasické koncepce, to znamená: transformátor – usměrňovač – filtr – stabilizátor.: (kompletní schéma napájení na obrázku 18)



Obrázek 18

Podle vypočteného příkonu jsem nejprve zvolil transformátor: 87 W- koncový stupeň + ostatní obvody + ztráty v samotném transformátoru = cca max. 105 W => **transformátor 125 VA – 220 V/24 V**. Dnes je však napětí v rozvodné síti navýšené z původních 220 V na 230 V, proto i na sekundárním vinutí transformátoru je napětí vyšší, 26 V.

Diody pro můstkový usměrňovač jsem volil podle kritérií: závěrné napětí- alespoň 90V, povolený proud – alespoň 3 A, ztrátový výkon – alespoň 2 W. Zvolil jsem typ **KY715 – 90 V, 20 A**.

2.3.1 Filtrace

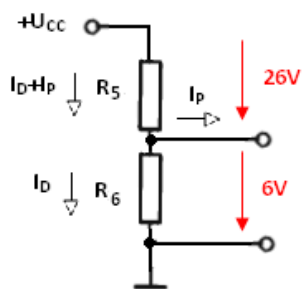
Kondenzátory C_{F1} C_{F2} jsem se rozhodl použít **5 mF**. Podle vzorce $U_{\sim} = \frac{U_{ss}}{4\sqrt{2} * p * f * R_z * C}$ [8]

vychází hodnota zvlněného napětí při použití jednoho kondenzátoru přibližně na 1V a při použití obou na 0,5 V. To je zvlnění **1,56 %**. Což není příliš, nicméně i takto malé zvlnění bylo v reproduktorech slyšet a proto jsem se rozhodl použít tlumivku TL_1 pro dokonalejší filtraci.

Jako **tlumivku** jsem použil převinutý transformátor z mikrovlnné trouby (**MOT**), kterého jsem původně chtěl využít pro napájení, ale tento transformátor má díky své konstrukci vysoké sycení jádra a díky svařeným E-I plechům, což uzavírá smyčku pro vířivé proudy, se tento transformátor i bez jakékoli zátěže hodně zahřívá. Bez aktivního chlazení velkým ventilátorem se neobejde. Avšak jako tlumivka, působí transformátor dokonale. Nyní je na kondenzátoru C_{F2} **zvlněné napětí**, podle měření, pouze 92 mV, což je **0,28 %** (při odběru proudu cca 3 A).

Tímto napětím (32 V) je napájen koncový stupeň. Stabilizaci jsem zde vynechal, protože klidový proud ve třídě A je neměnný, tzn. je stejný bez buzení zesilovače, jako při buzení. Stabilizace není potřeba.

Předzesilovač je napájen z odporového děliče, umístěném na tištěném spoji koncového stupně.



Obrázek 19

Výpočty jsou opět jednoduché. Nejprve jsem si změřil proud spotřebováváný předzesilovačem (I_P) – cca 14,32 mA. Stanovil proud

tekoucí děličem (I_D) – dvojnásobný – 29mA. $R_5 = \frac{U_{CC} - U_{R11}}{I_D + I_P} =$

$$\frac{32 - 6}{0,04332} = 600 \Omega / \text{min } 2 \text{ W (použit } \mathbf{680 \Omega / 6 W}). R_6 = \frac{6}{I_D} = \frac{6}{0,029} = 206$$

Ω (použit **270 Ω / 0,25 W**).

LED₁ slouží jako indikace zapnutí zesilovače. Její proud jsem stanovil na 10mA. Předřadný rezistor

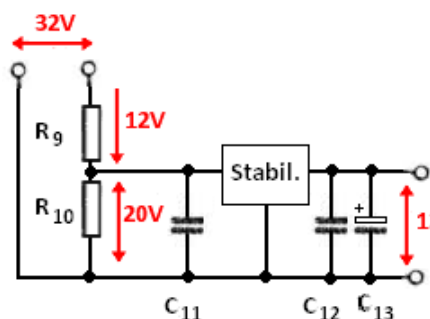
má hodnotu $R_{7,8} = \frac{U_{CC} - U_{LED1}}{I_{LED1}} = 3000 \Omega / 0,3 \text{ W}$ (dva rezistory 2k2+1k). Dioda je červená.

Jelikož jsem do zesilovače musel kvůli chlazení použít ventilátor, zvolil jsem 12 V z počítače, a také jsem chtěl použít indikátor úrovně budícího napětí, s maximálním napájecím napětí 16 V, bylo potřeba nějakým způsobem snížit napájecí napětí na požadované úrovně. Není vhodné použít pouze odporový dělič, protože indikátor nemá stálý odběr proudu a ani u ventilátoru jsem nevěděl s jakým výkonem bude muset pracovat, aby výkonové tranzistory zvládl chladit.

2.3.2 Stabilizace napětí pro ventilátor a indikátor

Ventilátor jsem použil co možná největší, aby mohl běžet v co nejmenších otáčkách (vydával co nejméně hluku) a přitom tranzistory bezpečně uchladi. Hodnotu napětí ventilátoru, která stačí na uchlazení tranzistorů je, dle mých měření, **4,5 V** a při té má **ventilátor** odběr **86 mA**. To je potřebný výkon 387 mW. Odběr **indikátoru** je max. **30 mA**.

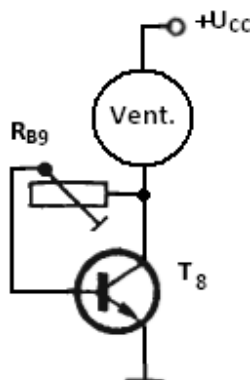
Tyto dvě zařízení jsem se rozhodl napájet ze stabilizátoru **MA7812** (dvanácti volty). Ovšem tento stabilizátor má maximální vstupní napětí 35 V. A jelikož jsem nechtěl, aby tento integrovaný obvod



Obrázek 20

Takže jsem musel zvolit takovou hodnotu napětí, aby dané napětí mohlo kolísat v rozmezí $\pm 3\text{V}$ a

činnost stabilizátoru nebyla ovlivňována. Toto napětí jsem stanovil na 20V.



Obrázek 21

Proud děličem na 110mA. Z toho rezistory $R_9 = \frac{U_{CC} - 20}{0,22} = 54 \Omega / 4 \text{ W}$. R_{10}

$= \frac{20}{0,11} = 181 \Omega / 4 \text{ W}$. Kondenzátory C_{11} a C_{12} jsou **100 nF**, keramické.

Ventilátor jsem také nechtěl napájet jen z děliče, pro možnost regulace jeho otáček. Regulátor jsem zvolil velmi jednoduchý. Doslova se nejedná o regulátor otáček, ale o regulátor proudu ventilátoru. Nicméně výsledný jev

je stejný. Počítal jsem: a) Když $U_V = 11\text{ V}$, tak $U_{CE8} = 1\text{ V} \Rightarrow I_C = 0,35\text{ A} \Rightarrow I_B = 3,5\text{ mA}$ ($h_{21E} = 100$).

$$\text{Pak } R_{B9} = \frac{U_{CC} - U_V - U_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 11 - 0,6}{0,0035} = \mathbf{114\ \Omega}$$

b) Když $U_V = 5\text{ V}$, tak $U_{CE8} = 7\text{ V} \Rightarrow I_C = 90\text{ mA} \Rightarrow I_B = 900\ \mu\text{A}$ ($h_{21E} = 100$).

$$R_{B9} = \frac{U_{CC} - U_V - U_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 5 - 0,6}{0,0009} = \mathbf{7\text{ k}\Omega} \text{ (} R_{B22} \text{ - bude trimr } \mathbf{10\text{ k}\Omega} \text{+ rezistor } \mathbf{120\ \Omega} \text{) Pro regulaci}$$

od minimálních otáček po maximální. Tranzistor T_V je typ **KF506**.

V **indikátoru vybuzení** jsou použity dva integrované obvody **BA656**, každý ovládá 5 LED diod. Indikátor je postaven na samostatném tištěném spoji a namontován do čelního panelu zesilovače.

2.4 Chlazení + jištění

Chlazení – Zesilovač jsem navrhoval tak, aby žádné součástky nemusely být chlazeny aktivně, ovšem aktivnímu chlazení se při takto velkých ztrátových výkonech (přes 80W) vyhnout nedá. Možné by to bylo, avšak konstrukce by vyžadovala chladiče koncových tranzistorů o příliš velkých rozměrech.

Chladič, který jsem si opatřil je hliníkový obdélníkového tvaru, o rozměrech 285x183x5 mm s žebry vysokými 35 mm. K němu jsem připevnil koncové tranzistory (zesilovače, proudového zdroje). Oba tranzistory mají pouzdro TO-3. Tyto pouzdra mají velkou plochu (4 cm²) a vyvrtané dva otvory (Ø 4 mm) pro možnost dokonalého uchycení na chladič. Po důkladném upevnění tranzistorů na chladič jsem zesilovač zkušebně zapnul, ale bez ventilátoru. Chtěl jsem vědět, jestli je ventilátor opravdu nutný. Po zapnutí jsem počkal až se teploty pouzder tranzistorů ustálí a poté jsem je změřil. A potvrdilo se, že i přes jejich kvalitní zapouzďení a upevnění tranzistorů, velikost chladiče nestačí. Na koncovém tranzistoru zesilovače jsem naměřil 71,3°C a koncovém tranzistoru proudového zdroje 74°C. Hraniční teplota (obecně), která je pro funkci tranzistorů ještě bezpečná a nijak nesnižuje jejich životnost a spolehlivost je přibližně 70°C. Při jejím dlouhodobém překračování může dojít k tepelnému průrazu tranzistoru. Samozřejmě vše závisí i na dalších okolnostech (zatížení tranzistoru, okolní teplota). Použití ventilátoru tedy bylo nutné.

Avšak z testů a měření vyplynulo, že k bezpečnému chlazení tranzistorů stačí, aby 12 V ventilátor běžel pouze na 4,5 V. Jeho otáčky jsou nízké a proto je skoro neslyšitelný. Teploty pouzder tranzistorů se po ustálení, pohybují kolem 55°C.

Dále bylo potřeba chladit tranzistor, který v zesilovači budí koncový a stabilizátor MA7812. Tyto prvky jsem umístil na společný chladič. Tranzistor, který budí koncový v proudovém zdroji a tranzistor v regulátoru proudu ventilátoru jsem také opatřil malými chladiči.

Diody v usměrňovači jsou také opatřeny chladiči. Pro dvě diody je jeden chladič, pro druhé dvě je další chladič.

Jištění zesilovače – Zesilovač je jištěn dvěmi tavnými pojistkami. První pojistka jistí zesilovač v primárním vinutí napájecího transformátoru, její hodnota je 1 A/T. Druhá pojistka jistí připojenou zátěž zesilovače (reproduktor) v případě průrazu jednoho ze dvou tranzistorů (koncový v zesilovači, koncový v proudovém zdroji). Její hodnota je 1,6 A/F. Dále je zesilovač jištěn proudovým zdrojem proti náhodnému zkratu výstupních svorek.

3 Vyhodnocení výsledků

V první části této práce byla stručně popsána teorie NF zesilovačů. Část druhá byla zaměřena na popis jednoho konkrétního NF zesilovače. Popisován byl postup jeho návrhu, vždy s výpočty a údaji, potřebnými k lepšímu vysvětlení funkce daných obvodů. Ovšem velká část výpočtů je nepřesná a spousta hodnot jednoduše "zvolená". Je tomu tak proto, že zanedbáním některých veličin můžeme ušetřit spoustu času a vyhnout se velmi složitým výpočtům. Některé hodnoty proudů a napětí jsou oproti jiným velmi malé a tím pádem zanedbatelné (např.: proud I_C se ve skutečnosti nerovná proudu I_E - zanedbán proud I_B). Jiné hodnoty se vypočítat přesně nedají, musí se tedy zvolit (např.: proudy odporovými děliči napětí). Nehledě na to, že výrobní rozptyl parametrů všech součástek, především tranzistorů, je značný. To se dotýká především výpočtů pro napěťové a proudové přenosy tranzistorů, které zde byly vynechány úplně (je potřeba znát parametry h). Tyto hodnoty jsem pouze odvozoval z charakteristik tranzistorů. Výrobce totiž ve svých katalogích tyto hodnoty buď neuvádí vůbec a nebo jen pro jeden konkrétní pracovní bod tranzistoru. Pokud je pracovní bod tranzistoru v zesilovači jiný, hodnoty nelze jednoduše použít. Výběr součástek byl popsán jen zběžně, protože hodnoty součástek v obvodech většinou nejsou kritické.

Parametry zesilovače:

Výstupní výkon: 15,6 W/800 Hz, pro zkreslení signálu **2 %**. Tento údaj uvádím pro zátěž 4Ω , do jiných zátěží je výstupní výkon samozřejmě jiný. Pro 4Ω by měl být největší, ale podle grafu (v přílohách) není. Z grafu je možno vidět, že při zátěži 4Ω , nedosahuje signál maximální možné efektivní velikosti amplitudy (dosahuje 7,9 V), protože při zátěži 8Ω je velikost amplitudy mnohem

větší (9,6 V). Protože při zátěži 4Ω je signál omezen velikostí proudu $I_z = \frac{U_z}{R_z} = \frac{7,9}{4} = 1,975 \text{ A}$.

Zátěží 8Ω teče menší proud $I_z = \frac{U_z}{R_z} = \frac{9,6}{8} = 1,2 \text{ A}$. Je tedy možné odvodit, že maximální hodnota napětí na výstupu je 9,6 V a maximální efektivní hodnota proudu tekoucího zátěží je 1,975 A.

Z toho je možno uvažovat ideální zátěž zesilovače: $R_{z \text{ ideální}} = \frac{U_z}{I_z} = \frac{9,6}{1,975} = 4,86 \Omega$. Při takové

zátěži by zesilovač byl teoreticky schopen dodat efektivní výstupní výkon 18,96 W.

Zkreslení: Údaj o výstupním výkonu do velké míry závisí na zkreslení výstupního signálu. Čím větší zkreslení tolerujeme, tím větší výkon naměříme. Já uvažoval za přípustnou hodnotu

zkreslení signálu 2 %. Jedná se především o zkreslení signálu vyššími harmonickými. Tento zesilovač zkresluje signál všemi harmonickými (sudými i lichými), liché však nepatrně převládají.

Citlivost: 210 mV, pro plné vybuzení zesilovače do zátěže 4 Ω . Téměř se shoduje s vypočtenou hodnotou (200 mV). Z tohoto údaje lze odvodit celkový napěťový přenos a celkové napěťové zesílení zesilovače: $A_u [-] = \frac{U_2}{U_1} = \frac{7,9}{0,21} = 37,61$. $A_u [dB] = 20 \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \log \frac{7,9}{0,21} = 31,5 \text{ dB}$.

Vstupní odpor: Vstupní odpor je dle měření **524 k Ω** , přičemž jej zajišťuje první zesilovací stupeň zesilovače. Tato hodnota vstupního odporu zajišťuje zesilovači velmi širokou oblast použitelnosti.

Energetická účinnost zesilovače: Účinnost celého zesilovače je udávána především účinností koncového stupně (spotřeba zesilovače je tvořena, odhadem, z 77 % koncovým stupněm, z 13 % ztrátami zdroje a cca 10 % ostatními obvody). Proto uvedu dva údaje: první – efektivní výstupní výkon proti spotřebě pouze koncového stupně, tzn. $\eta = \frac{P_{2_ef}}{P_{koncový_st.}} * 100 =$

$\frac{15,6}{87} * 100 = 17,93 \%$, druhý údaj: efektivní výstupní výkon proti spotřebě celého zesilovače:

$$\eta = \frac{P_{2_ef}}{P_{ss.}} * 100 = \frac{15,6}{112} * 100 = 13,92 \%$$

Kmitočtová charakteristika: Byla měřena v pásmu 20 Hz až 18k Hz. Je velmi vyrovnaná. Všechny měřené kmitočty leží v pásmu 1,35 dB. Při 20 Hz je napěťové zesílení zesilovače 29,09 dB, při 5 kHz je napěťové zesílení 30,44 dB => rozdíl 1,35 dB. Mezní kmitočty pro pokles 3 dB jsem neměřil, protože dolní mezní kmitočet bude jistě ležet pod 20 Hz a člověk stejně není schopen nižší kmitočty slyšet. Obdobou je horní mezní kmitočet, člověk není schopen slyšet kmitočty vyšší než cca 18 kHz. A myslím, že pro VF aplikace tento zesilovač nikdy využívat nebude.

3.1 Závěr

Na závěr bych rád uvedl, že tento zesilovač se pochopitelně nemůže po technické stránce srovnávat s továrně vyráběnými zesilovači, avšak to ani nebylo mým cílem. Mým cílem, při návrhu, bylo především získat nejenom teoretické, ale i praktické zkušenosti z této oblasti. A myslím, že jsem jich získal mnoho.

Tímto bych rád poděkoval Ing. Bc. Vlastimíru Dubovskému za odborné vedení mé dlouhodobé maturitní práce. Dále děkuji Bc. Josefu Pajerovi za umožnění výroby tištěných spojů zesilovače.

Josef Houzar

4 Použitá literatura

Literatura:

- [1] Čermák Jindřich, Jurkovič Kamil. *Návrh a konstrukce nízkofrekvenčních tranzistorových zesilovačů*. Praha: SNTL , 1974. 322 s
- [2] Kábele Josef, Hanák Jan, Melezinek Adolf. *Vysokofrekvenční technika II*. Praha: SNTL, 1966. 452 s
- [3] *Radiový konstruktér*. Praha: MNO, ročník II, 1966, číslo 3. 64 s
- [4] Syrovátko Milan. *Nízkofrekvenční tranzistorová zapojení*. Praha: SNTL, 1973. 194 s
- [6] *Amatérské rádio*. Praha: NAŠE VOJSKO, ročník XXIX, číslo 9, řada A. 40 s
- [7] Lukeš Jaroslav. *Věrný zvuk*. Praha: SNTL, 1962. 328 s
- [8] Funke Rainer, Liebscher Siegfried, překlad Kašpar Jiří. *Základní elektronická zapojení*. Praha: SNTL, 1976. 184 s

Internetové stránky:

- [5] http://ok1ike.nagano.cz/soubory/tranzistor_2.htm

5 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Transformátorová vazba mezi stupni zesilovače – převzato z [3]

Obrázek 2 – Kapacitní vazba mezi stupni zesilovače – převzato z [3]

Obrázek 3 – Stejnoseměrná vazba mezi stupni zesilovače – převzato z [3]

Obrázek 4 – Zesilovač jako čtyřpól se základními parametry – převzato z [3]

Obrázek 5a – Jednočinné zapojení tranzistorového koncového stupně s kolektorovým rezistorem

Obrázek 5b – Jednočinné zapojení tranzistorového koncového stupně s proudovým zdrojem

Obrázek 5c – Dvojčinné zapojení tranzistorového koncového stupně

Obrázek 6 – Blokové schéma zesilovače

Obrázek 7 – První návrh koncového stupně

Obrázek 8 – Koncový stupeň s proudovým zdrojem

Obrázek 9 – Proudový zdroj

Obrázek 10 – Náhrada výkonového tranzistoru PNP – převzato z [5]

Obrázek 11 – Podrobné schéma koncového stupně

Obrázek 12 – Impedanční přizpůsobovač

Obrázek 13 – Korekční zesilovač

Obrázek 14 – Vstupní zesilovač

Obrázek 15 – Průběhy různých typů potenciometrů – převzato z [6]

Obrázek 16 – Průběhy upraveného lineárního potenciometru ve srovnání s logaritmickým pot. - [6]

Obrázek 17 – Vstupní impedanční zesilovač

Obrázek 18 – Schéma napájení zesilovače

Obrázek 19 – Dělič napětí pro předzesilovač

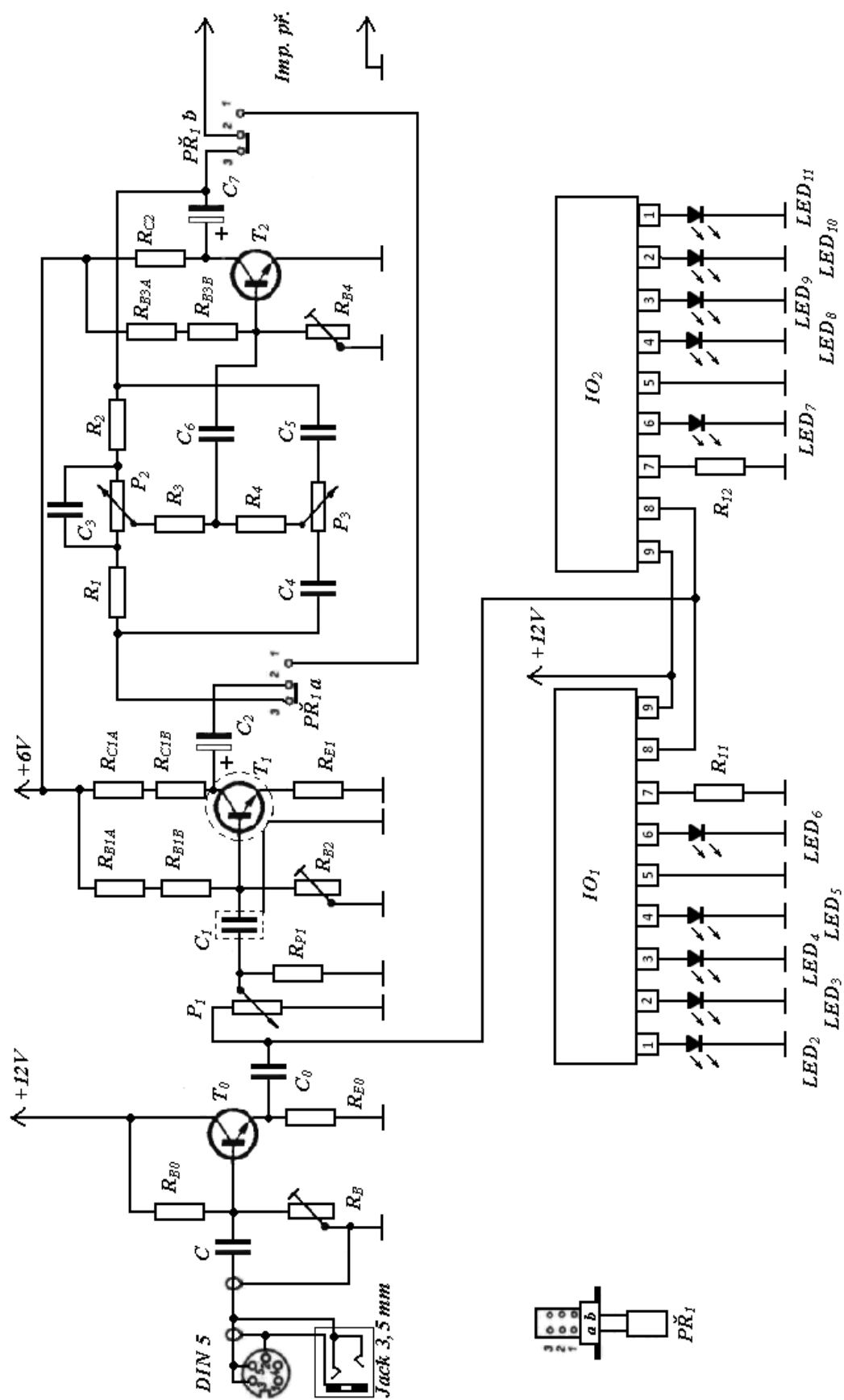
Obrázek 20 – Stabilizátor napětí pro ventilátor, indikátor úrovně budícího signálu a vstupní zes.

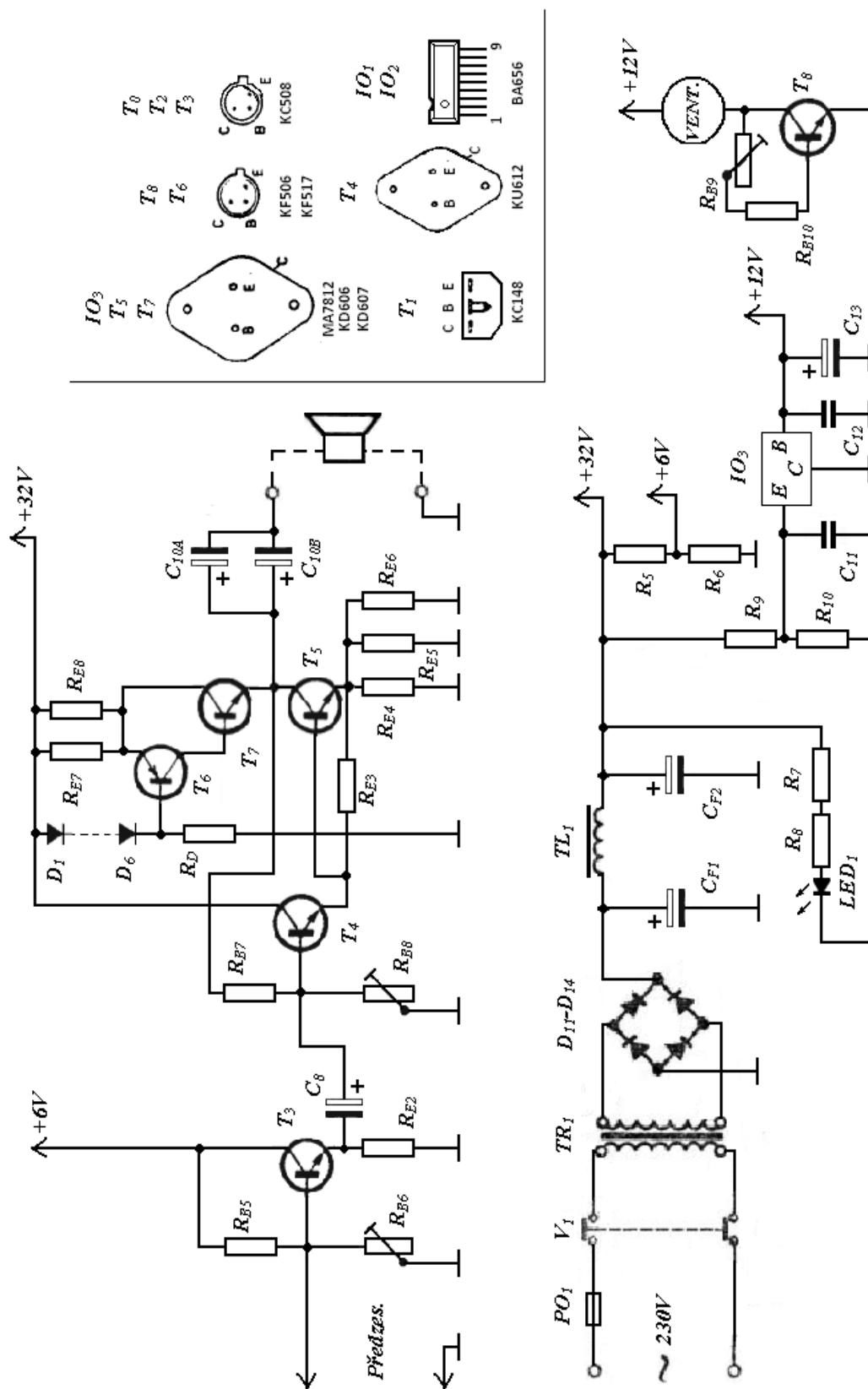
Obrázek 21 – Regulátor proudu ventilátoru

6 Seznam příloh

Příloha:	Strana
1. Schéma zesilovače – první část.....	37
1.1 schéma zesilovače – druhá část.....	38
2 Seznam součástek -první část.....	39
2.2 seznam součástek – druhá část.....	40
2.3 seznam součástek – třetí část.....	41
3 Plošné spoje – předzesilovač.....	42
3.1 koncový stupeň.....	43
4 Grafy – zatěžovací charakteristika zdroje.....	44
4.1 kmitočtová charakteristika zesilovače.....	44
4.2 graf závislosti výstupního výkonu zesilovače na velikosti zátěže.....	45
4.3 kmitočtová charakteristika korekčního zesilovače.....	45
4.4 grafy odporu potenciometru s rezistorem v dolní větvi v závislost na poloze jezdce.....	46
5 Hotový zesilovač – přední strana.....	47
– zadní strana.....	48
– vnitřní pohled.....	49

1 Schéma zesilovače





2 Seznam součástek

Rezistor	Druh	Hodnota [Ω]	Zatížení [W]
R _B	odporový trimr	1M	0,5
R _{B00}	vrstvý	1M	0,5
R _{B0}	vrstvý	1M	1
R _{B1A}	vrstvý	270k	0,5
R _{B1B}	vrstvý	M5	0,5
R _{B2}	odporový trimr	1M5	0,2
R _{B3A}	vrstvý	180k	0,5
R _{B3B}	vrstvý	220k	0,5
R _{B4}	odporový trimr	100k	0,2
R _{B5}	vrstvý	15k	0,25
R _{B6}	odporový trimr	47k	0,2
R _{B7}	vrstvý	2k2	0,25
R _{B8}	odporový trimr	1k	0,2
R _{B9}	odporový trimr	10k	0,2
R _{B10}	vrstvý	100	0,5
R _{C1A}	vrstvý	2k2	0,25
R _{C1B}	vrstvý	5k6	0,25
R _{C2}	vrstvý	10k	0,25
R _{E0}	vrstvý	47k	0,25
R _{E1}	vrstvý	2k2	0,25
R _{E2}	vrstvý	220	0,5
R _{E3}	vrstvý	16	1
R _{E4}	drátový	500m	2
R _{E5}	drátový	500m	2
R _{E6}	drátový	500m	2
R _{E7}	drátový	2,2	6
R _{E8}	drátový	2,2	6

R ₁	vrstvý	4k7	0,25
R ₂	vrstvý	4k7	0,25
R ₃	vrstvý	39k	0,25
R ₄	vrstvý	5k6	0,25
R ₅	drátový	680	6
R ₆	vrstvý	270	0,25
R ₇	drátový	2k2	0,5
R ₈	vrstvý	1k	0,25
R ₉	drátový	54	6
R ₁₀	drátový	180	6
R ₁₁	vrstvý	10k	0,25
R ₁₂	vrstvý	10k	0,25
R _{P1}	vrstvý	100k	0,5
P ₁	potenciometr	250k/N	0,5
P ₂	potenciometr	2x100k	0,5
P ₃	potenciometr	2x100k	0,5

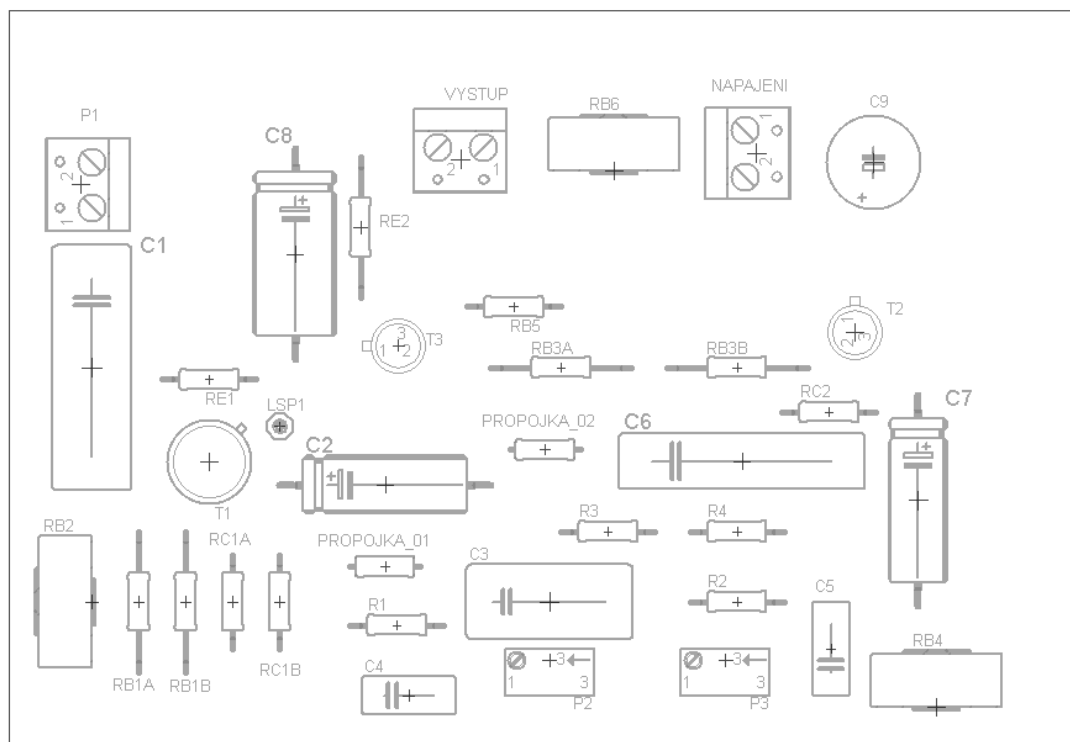
Kondenzátor	Druh	Hodnota	Napětí [V]
C	plastový	150nF	100
C ₀	plastový	1uF	100
C ₁	plastový	220nF	100
C ₂	elektrolytický	2,2uF	160
C ₃	plastový	47nF	160
C ₄	plastový	1,5nF	630
C ₅	plastový	1,5nF	630
C ₆	plastový	330nF	100
C ₇	elektrolytický	4,7uF	100
C ₈	elektrolytický	220uF	25
C _{10A}	elektrolytický	2mF	50
C _{10B}	elektrolytický	470uF	40

C ₁₁	keramický	100nF	32
C ₁₂	keramický	100nF	32
C ₁₃	elektrolytický	470uF	16
C ₁₄	elektrolytický	1mF	40
C _{F1}	elektrolytický	5mF	50
C _{F2}	elektrolytický	5mF	50

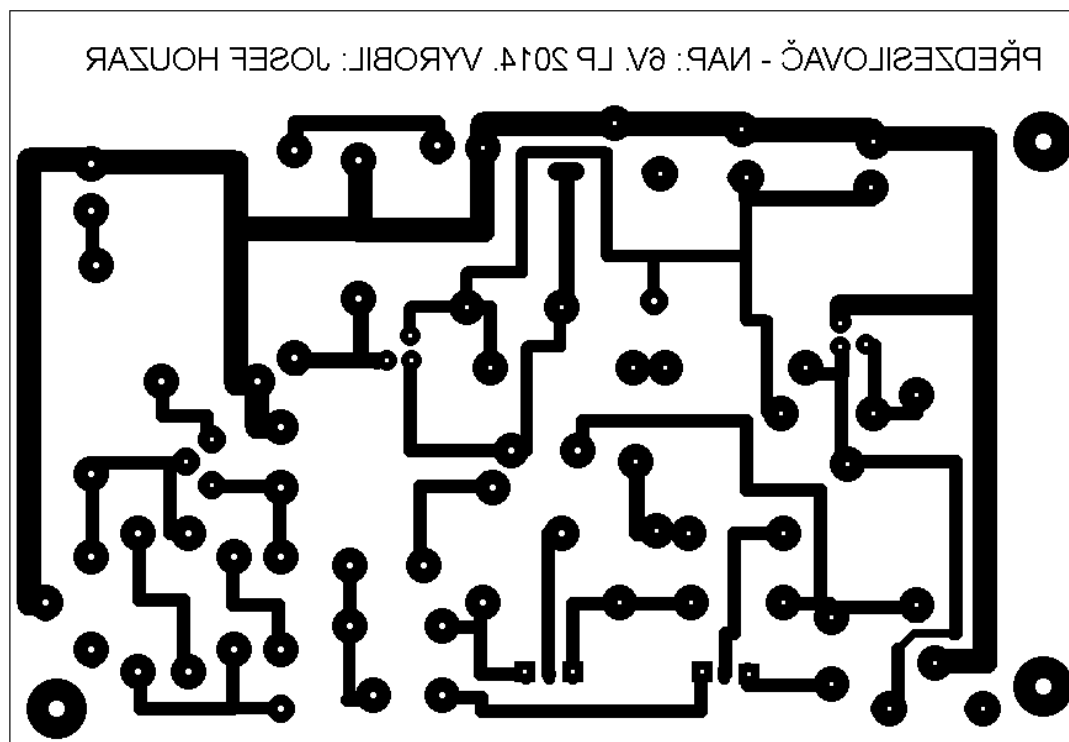
Polovodič	Druh	Typ
T ₀	Křemíkový tranzistor	KC 508
T ₁	Křemíkový tranzistor	KC 148
T ₂	Křemíkový tranzistor	KC 508
T ₃	Křemíkový tranzistor	KC 508
T ₄	Křemíkový tranzistor	KU 612
T ₅	Křemíkový tranzistor	KD 606
T ₆	Křemíkový tranzistor	KF 517
T ₇	Křemíkový tranzistor	KD 607
T ₈	Křemíkový tranzistor	KF 506
D ₁ - D ₆	Křemíková dioda	KY 133
D ₁₁ - D ₁₄	Křemíková dioda	KY 715
LED ₁ - LED ₁₁	Svítivá dioda	
IO ₁ , IO ₂	integrovaný obvod	BA 656
IO ₃	integrovaný obvod	MA 7812

Ostatní součástky	Druh	Typ
PO ₁	pojistka	1 A/T
PO ₂	pojistka	1,6 A/F
TR ₁	síťový transformátor	TVN1 07-10 6; 220/24; 125 VA
TL ₁	tlumivka	převinutý MOT
V ₁	síťový vypínač	250 V/2 A
PŘ ₁	přepínač	

3 Plošný spoj - předzesilovač

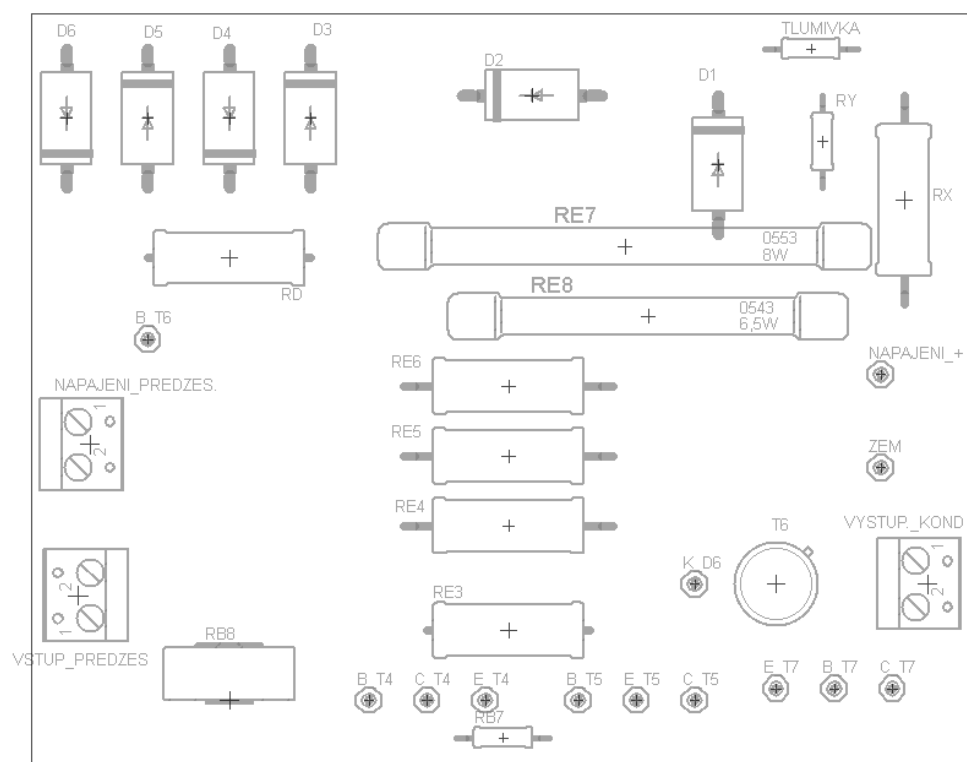


Rozmístění součástek

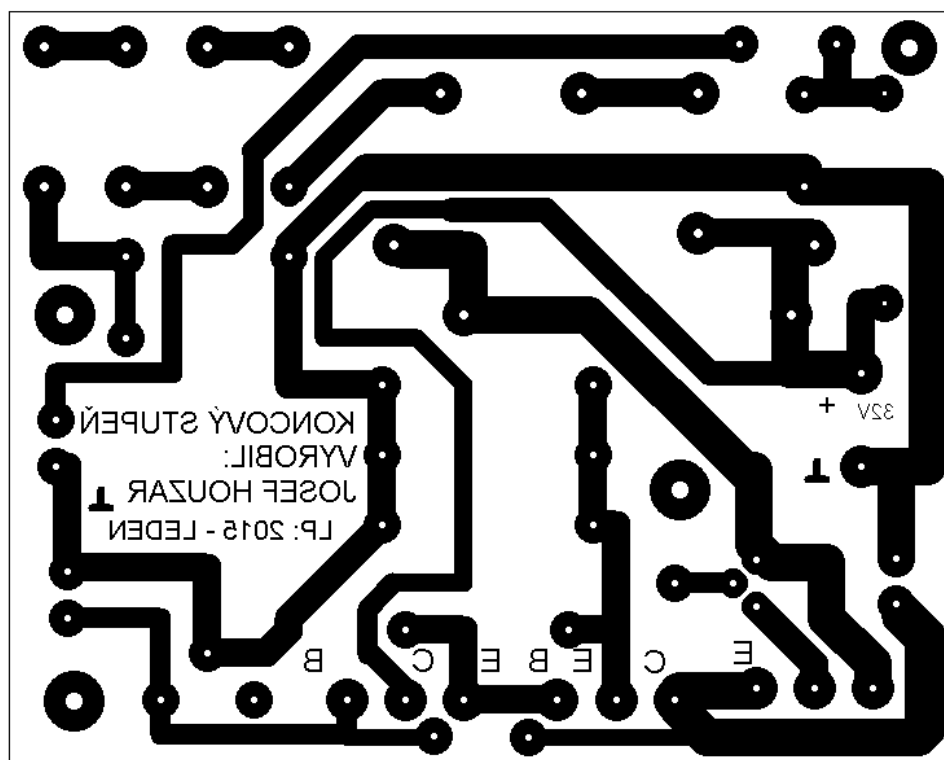


Předloha pro leptání

3.1 Plošný spoj – koncový stupeň

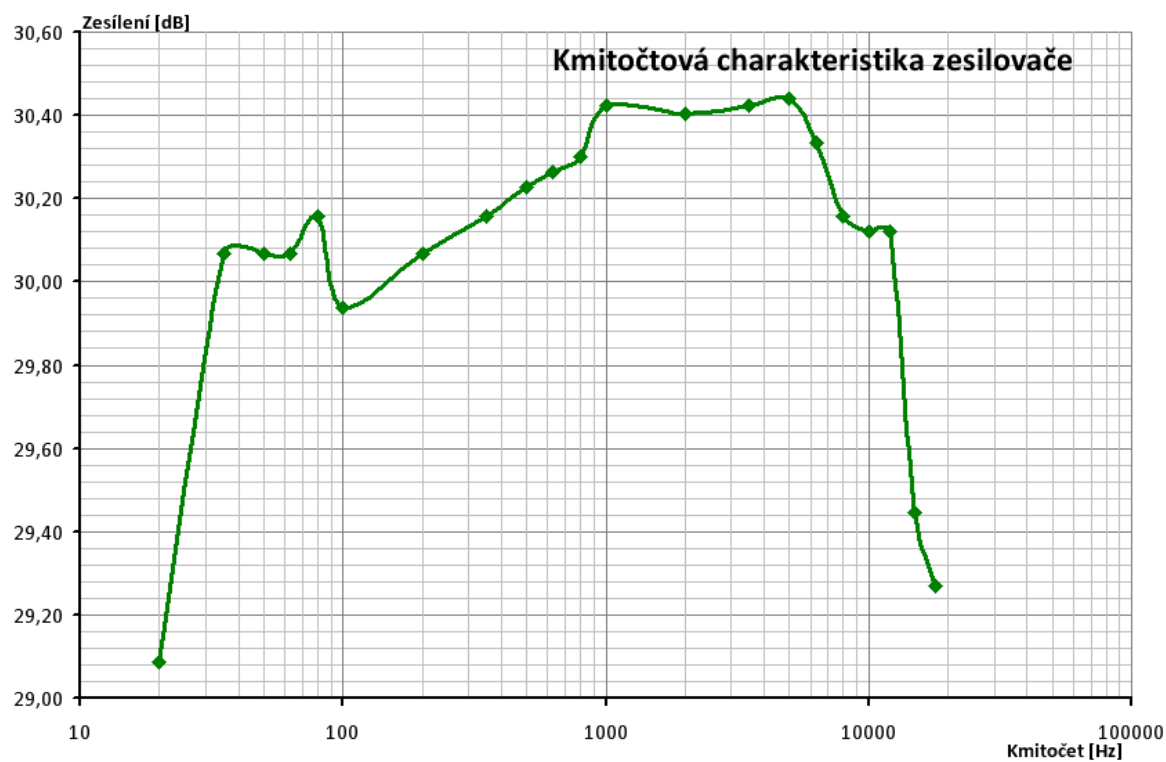
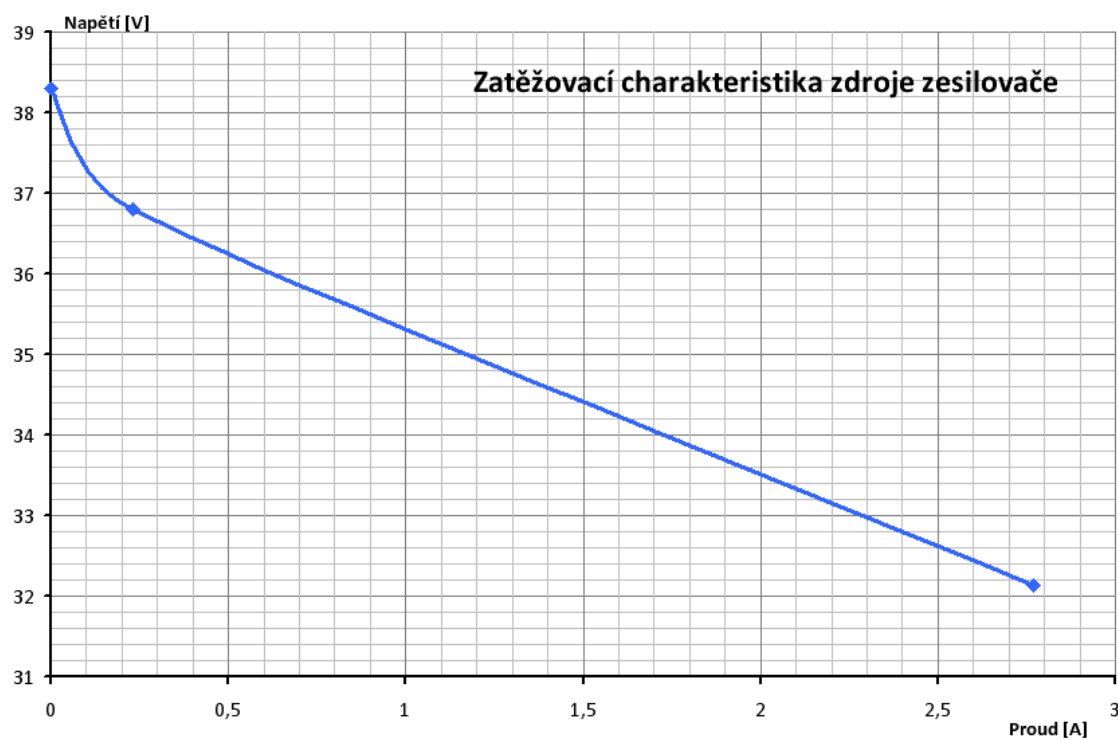


Rozmístění součástek



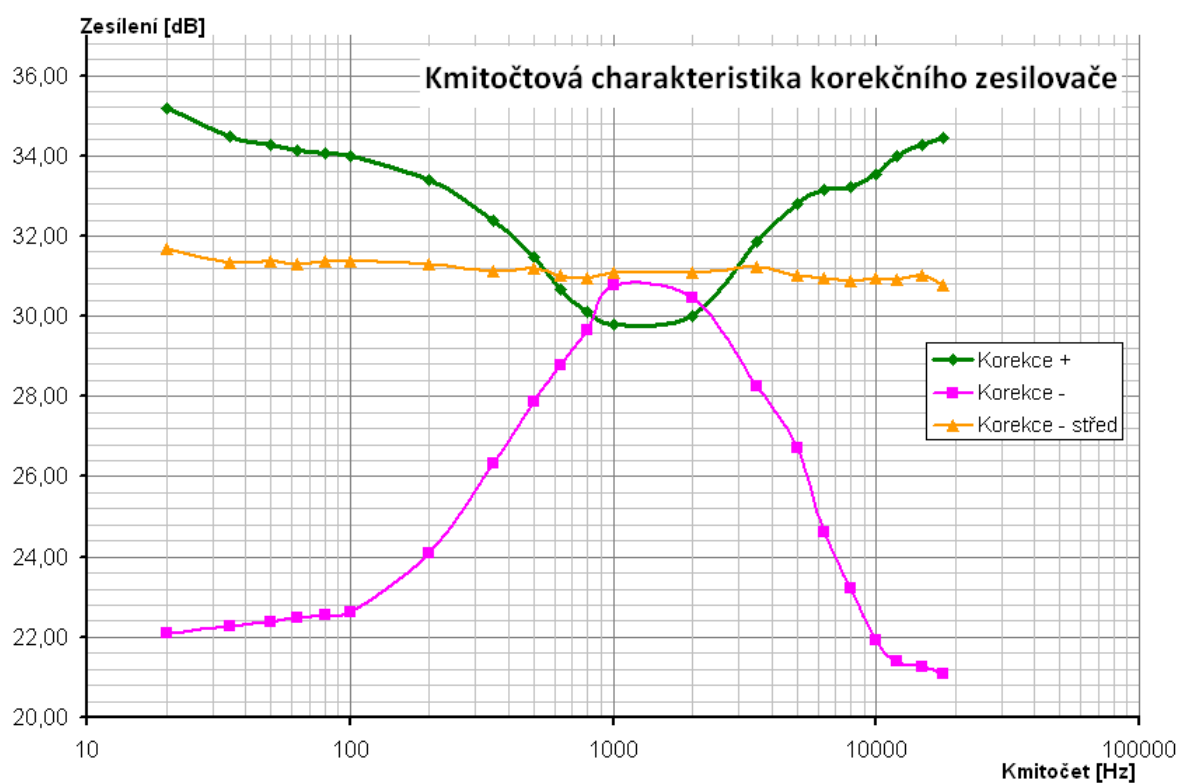
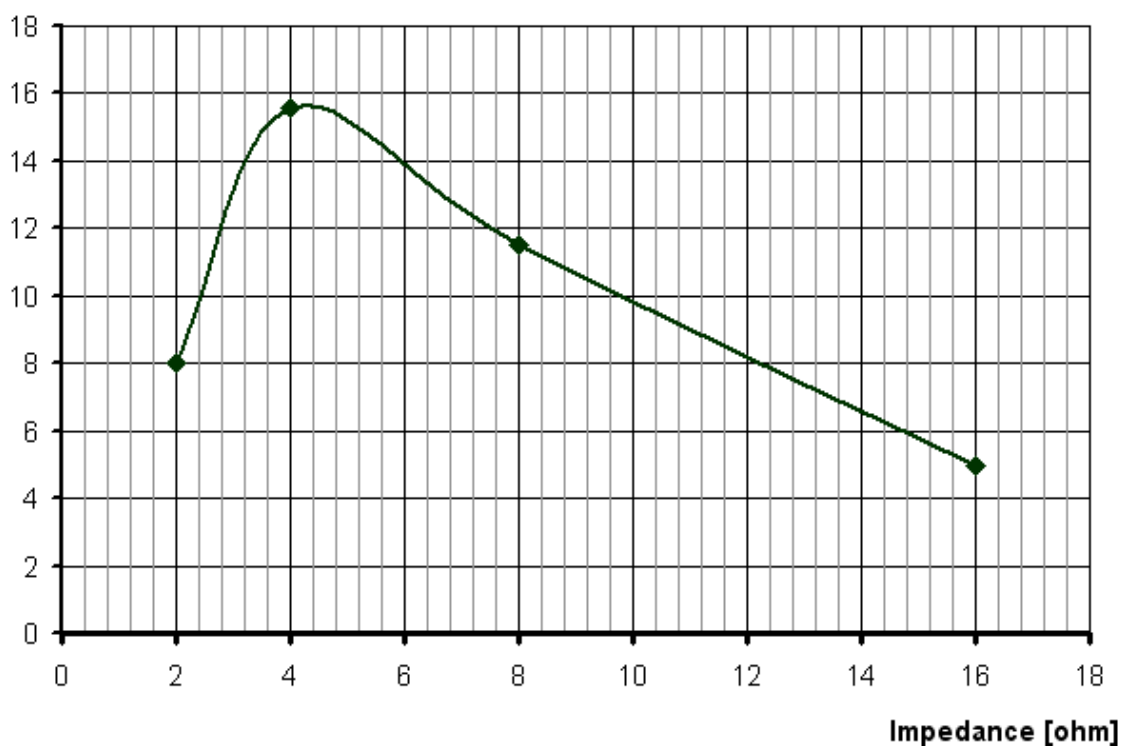
Předloha pro leptání

4 Grafy

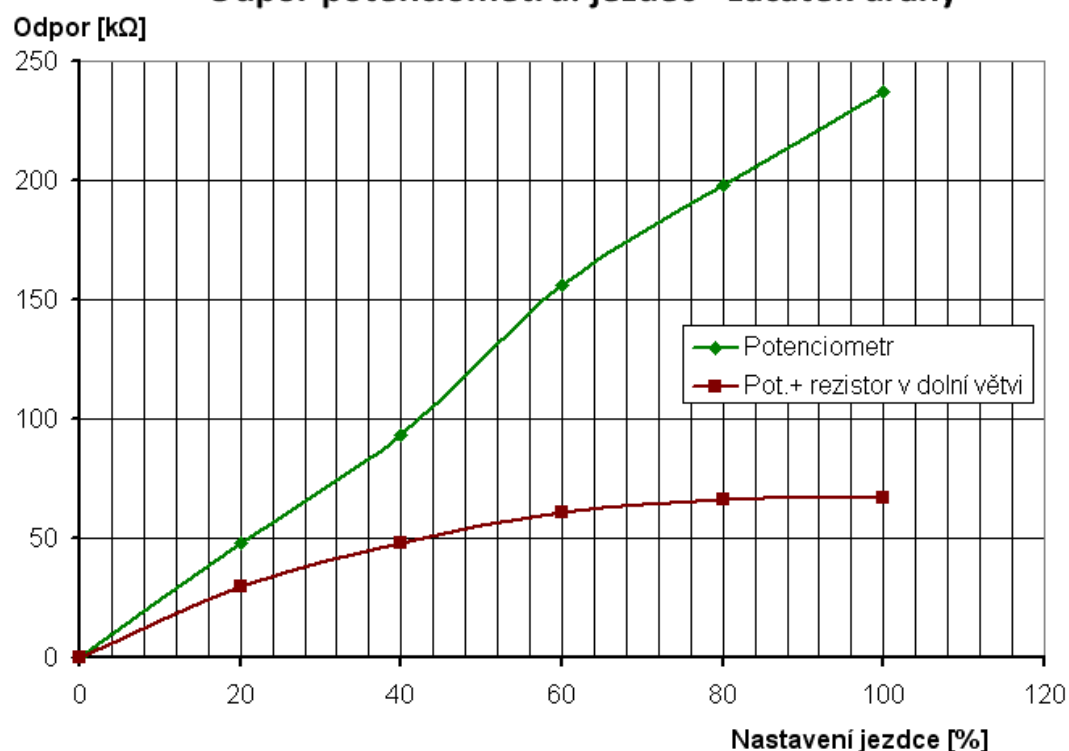


Závislost výstupního výkonu zesilovače na velikosti zátěže

Výst. výkon [W]

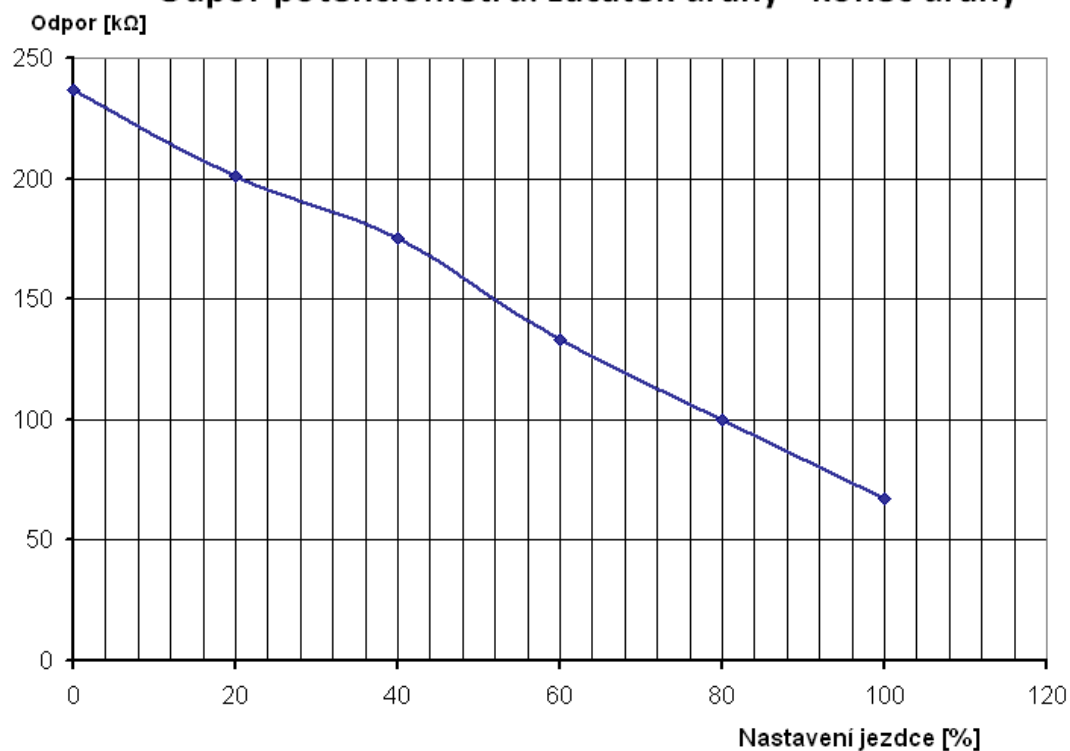


Odpor potenciometru: jezdec - začátek dráhy



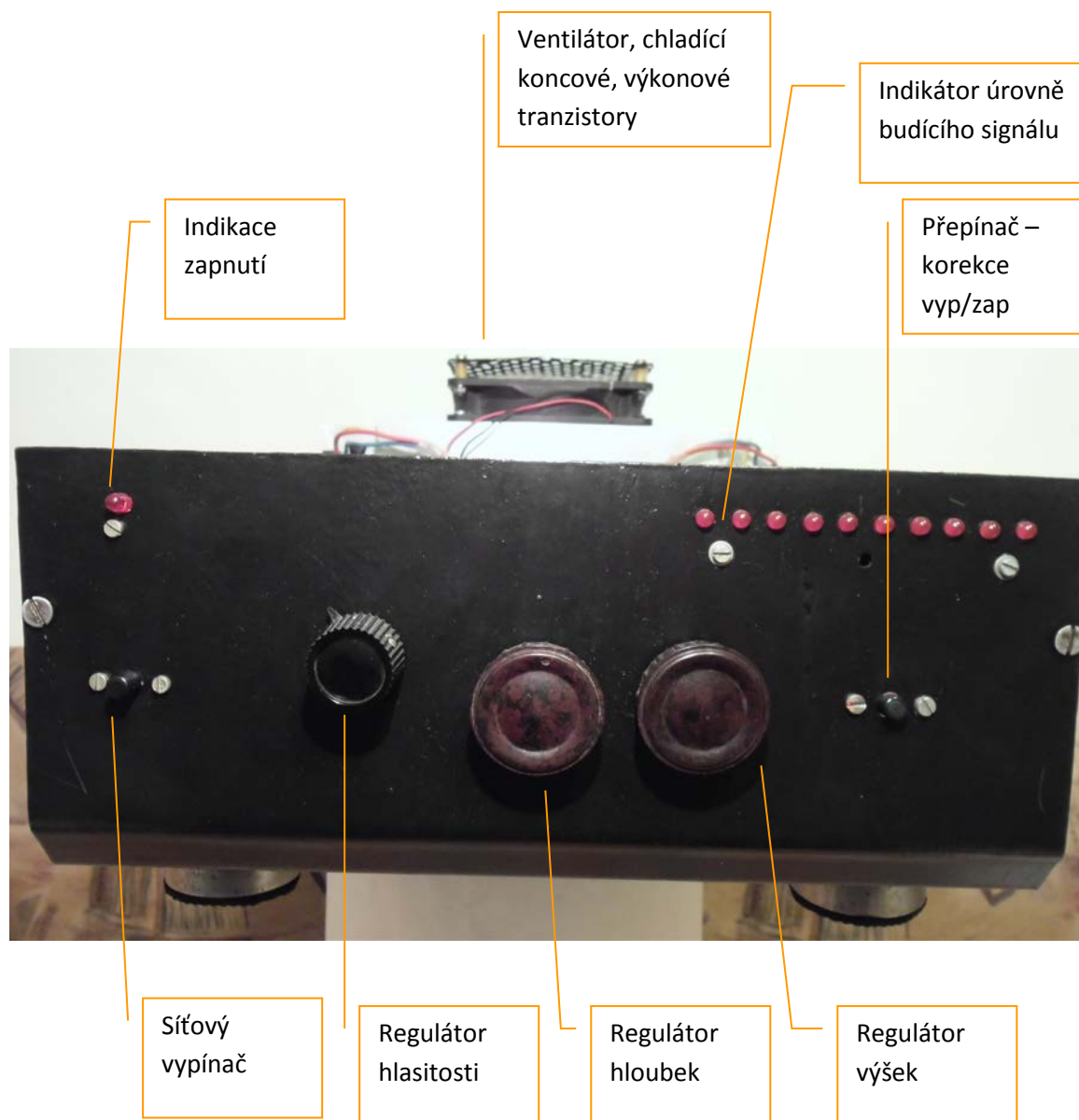
Úprava lineárního potenciometru na logaritmický. Potenciometr je 250 k/N, rezistor v jeho dolní větvi je 100 kΩ.

Odpor potenciometru: začátek dráhy - konec dráhy

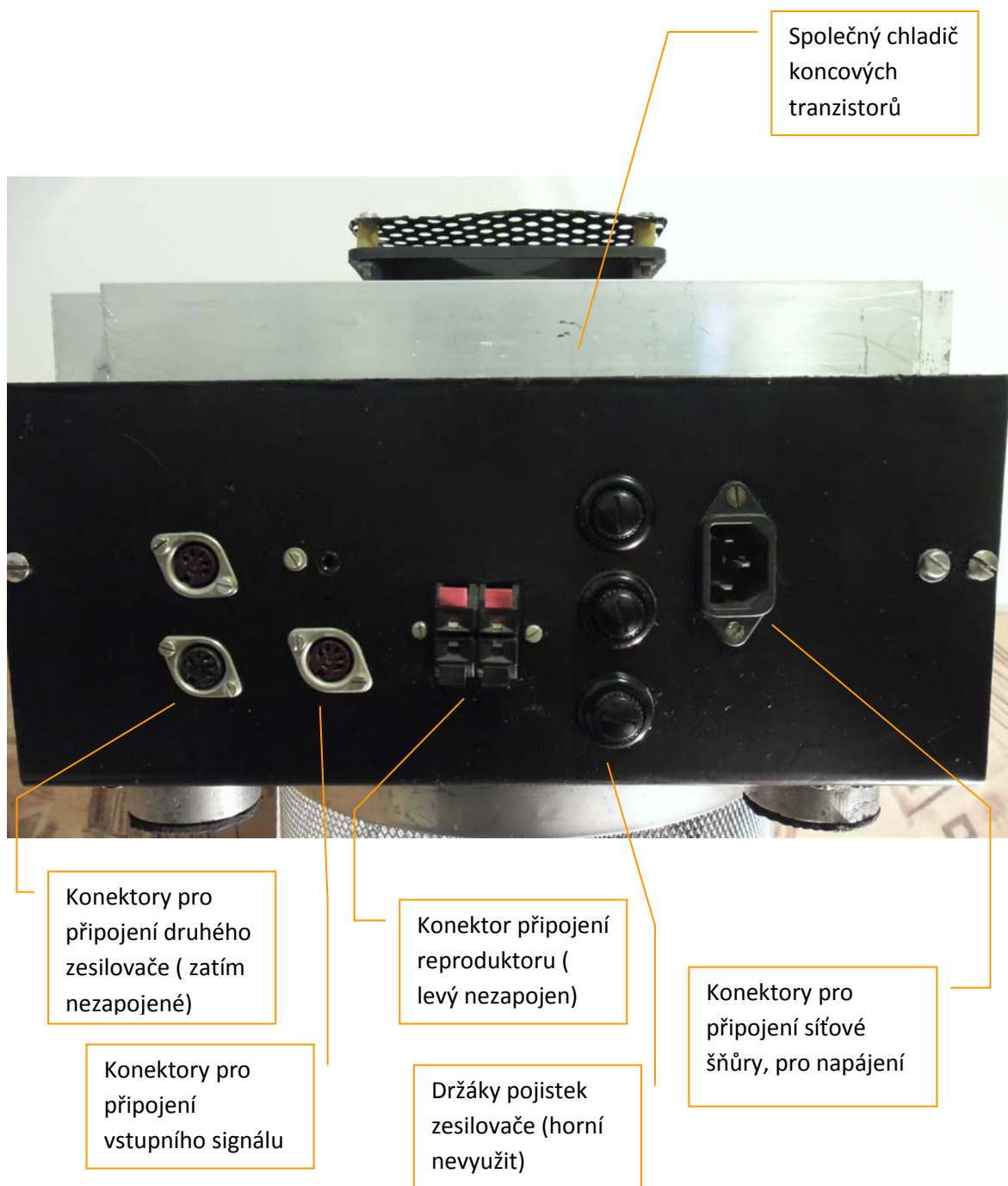


Vstupní odpor upraveného lineárního potenciometru. P a R jsou stejné jako v předchozím měření.

5 Hotový zesilovač



Zesilovač – pohled z přední strany + popis ovládacích prvků



Zesilovač – pohled ze zadní strany + popis konektorů

