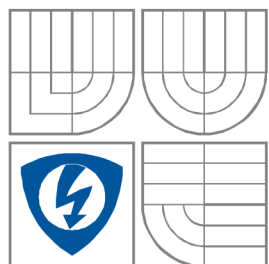


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ELEKTRONKOVÝ SLUCHÁTKOVÝ ZESILOVAČ VACUUM TUBE HEADPHONE AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

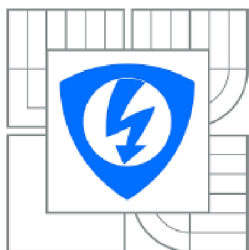
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Tomáš Musil

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Tomáš Musil
Ročník: 3

ID: 158200
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Elektronkový sluchátkový zesilovač

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je seznámit se s principem funkce a technikou zapojení elektronkových součástek a vytvoření návrhu s výslednou realizací audio sluchátkového zesilovače. Zařízení bude pracovat ve třídě A s důrazem na kvalitu zpracovávaného signálu v celém slyšitelném spektru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2015

Termín odevzdání: 4.6.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, 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 bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací elektronkového sluchátkového zesilovače pracujícího ve třídě A. V práci je přiblížen princip funkce elektronky, její používané druhy, základní způsoby zapojení v obvodu, návrh stabilizovaných napájecích zdrojů a také realizace funkčního zařízení včetně měření jeho parametrů.

Abstract

This Bachelor's thesis deals with design and realization of vacuum tube headphone amplifier working in class A. There is a closer look into operating principals of vacuum tube, most common types, basic ways to use it in electronic circuit, designing stabilized power supplies and also realization of functional prototype and measuring it's parameters.

Klíčová slova

Elektronka, trioda, pracovní bod, anodové napětí, anodový proud, zesilovač, transformátor, stabilizace, žhavení.

Keywords

Vacuum tube, triode, bias point, plate voltage, plate current, amplifier, transformer, stabilization, heating.

MUSIL, T. *Elektronkový sluchátkový zesilovač*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2015. 43 s., 7 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Elektronkový sluchátkový zesilovač“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 4. června 2015

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Házemu, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 4. června 2015

.....
podpis autora

Obsah

Obsah	6
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Úvod	10
1 Elektronka	11
1.1 Historie.....	11
1.2 Současný stav.....	11
1.3 Konstrukce.....	12
1.4 Princip.....	13
1.4.1 Žhavení.....	13
1.5 Rozdělení podle typu.....	14
1.5.1 Dioda.....	15
1.5.2 Trioda.....	16
1.5.3 Pentoda.....	18
1.6 Dynamické parametry.....	20
1.7 Ostatní parametry.....	21
2 Zapojení zesilovače s elektronkou	21
2.1 Třídy zesilovačů.....	21
2.1.1 Třída A.....	21
2.1.2 Třída B.....	22
2.1.3 Třída AB.....	23
2.2 Základní stupně s elektronkami.....	23
2.2.1 Zapojení se společnou katodou.....	23
2.2.2 Zapojení se společnou anodou.....	24
3 Návrh	25
3.1 Návrh předzesilovače.....	28
3.2 Návrh koncového stupně.....	32
3.3 Napájení.....	34
3.3.1 Zdroj žhavení.....	34
3.3.2 Anodový zdroj.....	35
4 Měření	38
4.1 Měření pracovního bodu.....	38

4.2	Měření zesílení a šířky pásma.....	38
4.3	Měření parametru odstup signál-šum a přeslechů.....	39
Závěr	40
Seznam použité literatury	41
Seznam zkratk a symbolů	43
Přílohy	44

Seznam obrázků

Obr. 1 - Mikrofon Neumann/Telefunken U47	12
Obr. 2 - Konstrukce triody.....	12
Obr. 3 - Jednoduché zapojení diody v obvodu	13
Obr. 4 - Přímo žhavená dioda.....	15
Obr. 5 - Provozní charakteristika diody GZ34	16
Obr. 6 - Trioda.....	16
Obr. 7 - Převodní charakteristika triody ECC83	17
Obr. 8 - Anodová charakteristika triody ECC83	17
Obr. 9 - Pentoda.....	18
Obr. 10 - Převodní charakteristika pentody EL84	19
Obr. 11 - Anodová charakteristika pentody EL84.....	19
Obr. 12 - Třída A	22
Obr. 13 - Třída B	22
Obr. 14 - Třída AB	23
Obr. 15 - Zapojení se společnou katodou	24
Obr. 16 - Zapojení se společnou anodou	25
Obr. 17 - Měření impedance sluchátek.....	26
Obr. 18 - Závislost impedance sluchátek na frekvenci.....	27
Obr. 19 - Nastavení pracovního bodu ECC83 (převodní charakteristika)	29
Obr. 20 - Nastavení pracovního bodu ECC83 (anodová charakteristika).....	29
Obr. 21 - Schéma zapojení předzesilovače.....	30
Obr. 22 - Převodní charakteristika elektronky ECC82.....	32
Obr. 23 - Schéma zapojení koncového stupně	32
Obr. 24 - Schéma zapojení zdroje žhavení	34
Obr. 25 - Schéma zapojení anodového zdroje.....	35
Obr. 26 - Simulace závislosti výstupního napětí stabilizátoru na vstupním.....	36
Obr. 27 - Simulace chování proudové ochrany	37
Obr. 28 - Šířka pásma zesilovače	39
Obr. 29 - Schéma zapojení napájecích zdrojů	44
Obr. 30 - Rozmístění součástek na DPS zdroje.....	45
Obr. 31 - TOP vrstva DPS.....	45

Obr. 32 - BOTTOM vrstva DPS.....	45
Obr. 33 - Schéma zapojení zesilovače (1 kanál)	46
Obr. 34 - Hotový výrobek (1).....	49
Obr. 35 - Hotový výrobek (2).....	49
Obr. 36 - Hotový výrobek (3).....	50

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Názvosloví elektronek.....	15
Tabulka 2 - Technické parametry sluchátek Sennheiser HD 650	25
Tabulka 3 - Naměřené hodnoty impedance sluchátek v závislosti na frekvenci.....	26
Tabulka 4 - Návrhová tabulka elektronek vhodných pro předzilovač.....	28
Tabulka 5 - Parametry transformátoru Lundahl LL1660/10mA (zapojení Alt Q).....	33
Tabulka 6 - Naměřené hodnoty pracovního bodu elektronek	38
Tabulka 7 - Rozpiska součástek	47
Tabulka 8 - Naměřené hodnoty pro stanovení šířky pásma zesilovače.....	48

Úvod

Elektronky od svého nástupu na počátku 20. století zcela změny svět elektrotechniky a elektroniky. Postupně si našly cestu do každé domácnosti, kde se usadily v rádiích, zesilovačích a prvních televizorech. Po klidném půl století, kdy se tato součástka nacházela prakticky ve většině elektrospotřebičů tehdejší doby, však byly postupně vytlačeny polovodičovou technologií. Stále se však najde mnoho příznivců nebo milovníků jejich nezaměnitelného kouzla, muzikantů a audiofilů, stejně tak jako výrobců, kteří nedají na elektronky dopustit.

Prvotním impulsem k realizaci elektronkového sluchátkového zesilovače byla nostalgická touha po vytvoření přístroje, založeného na staré a klasické technologii. V kombinaci s moderními výrobními procesy, jež dnes umožňují výrobu akustických měničů s prvotřídními vlastnostmi a perfektním zvukovým projevem (např. sluchátka Sennheiser HD 650) má tento projekt potenciál k vytvoření vhodné kombinace audio zařízení, která svému posluchači poskytnou špičkový poslech s nádechem „vintage“ zvuku.

1 Elektronka

Tato kapitola pojednává o historii elektronky, vysvětluje princip její funkce a také poukazuje na to, proč je i dnes takto stará technologie stále žádaná.

1.1 Historie

První elektronku vynalezl v roce 1904 britský fyzik John Ambrose Fleming. Použitím klasické Edisonovy žárovky a přidáním další elektrody sestrojil první usměrňovací diodu [1]. O tři roky později v objevu pokračoval americký vynálezce Lee De Forest, který mezi anodu a katodu vložil další elektrodu (mřížku), čímž vytvořil tzv. Audion – první triodu [2].

Tímto objeven byl odstartován rozmach mnoha oborů, např. elektroniky, radiotechniky, výpočetní techniky a řady dalších oblastí. Elektronky kralovaly elektrickým obvodům – sloužily jako usměrňovací, řídicí nebo zesilovací prvky všech přístrojů; díky nim se lidé mohli dorozumívat na dálku pomocí rádia, tvořily hlavní část všech vizualizačních přístrojů – televizorů a monitorů, a to až do doby objevu prvního tranzistoru v roce 1947 [3]. Od té chvíle vedly dlouhý boj o svoji existenci, který definitivně prohrály během 80. a 90. let s nástupem pokročilé polovodičové a LCD technologie.

Výrobky s elektronkami tvoří jen velmi malou, až zanedbatelnou část dnešního trhu s elektronikou. Často je lze ještě najít ve starých rádiích a zesilovačích, měřicím vybavení (např. analogové osciloskopy, harmonické analyzátoři, optické spektrometry atd.), mnoho profesionálních počítačových hráčů stále používá CRT (cathode-ray tube) monitory raději než LCD díky jejich nízké latenci a vysoké zobrazovací frekvenci. Je zde ale jisté místo, kde pravděpodobně elektronka nebude nikdy nahrazena.

1.2 Současný stav

Svůj prim drží elektronky v oblasti kytarové, baskytarové a profesionální zvukové techniky. V současnosti na trhu figuruje mnoho výrobců – v kytarové technice např.: Blackstar, Diezel, Engl, Fender, Marshall, Mesa Boogie a mnoho dalších, jejichž produkty jsou založeny čistě jen na elektronkovém, popřípadě hybridním osazením zesilujících prvků.

Totožná je i situace v oblasti studiové techniky (nahrávání i mastering). Příkladem může být věhlasný mikrofon Neumann/Telefunken U47, vyráběný již ve 40. letech [4]. Jedná se o studiový kondenzátorový mikrofon s přepínatelnou kulovou nebo kardioidní směrovou charakteristikou, jehož součástí byl i přenosný zesilovač. V jeho útroběch se skrývala, dnes již nedostupná, pentoda Telefunken VF14M.

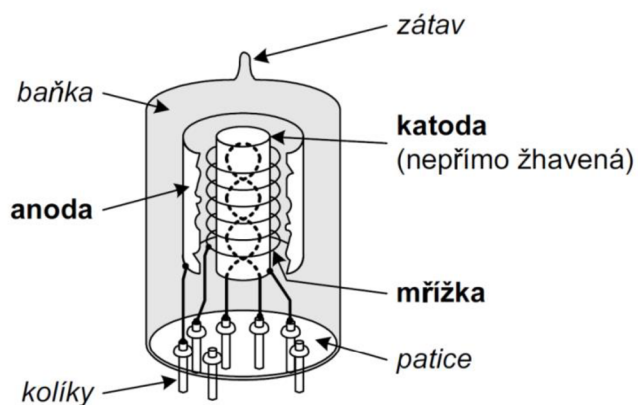
V nabídkách výrobců studiové techniky se nachází široké spektrum zařízení, která se zakládají právě na použití elektronek, např.: mikrofonní zesilovače, dynamické procesory, harmonizéry a vitalizéry firem jako je ART, SPL, TL Audio a mnoho dalších. Jejich výhodou oproti tranzistorovým výrobkům a také proč jsou tak žádané, je výsledný zvukový projev, velice často shodně popisován jako hřejivý, jemnější a měkčí.



Obr. 1 - Mikrofon Neumann/Telefunken U47 [5]

1.3 Konstrukce

Základem každé elektronky je vakuově uzavřená skleněná nebo keramická baňka, uvnitř které se nachází podle druhu určitý počet elektrod. Ty jsou přes kovové kolíky vyvedeny do spodní části součástky, k nimž jsou připojeny jednotlivé elektronické části uvnitř elektronky – anoda, katoda, žhavení, ovládací mřížky, popř. i stínění. Pro názornost je na Obr. 2 znázorněn principiální náčrt konstrukce elektronky s jednou řídicí elektrodou – trioda.



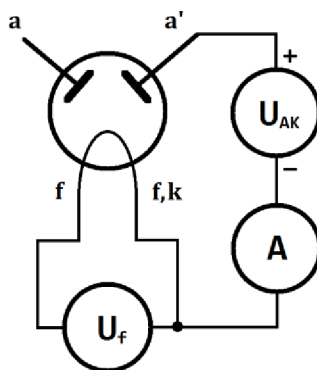
Obr. 2 - Konstrukce triody [1]

Aby elektronka mohla fungovat, je nutné zajistit v prostoru s elektrodami vysokou úroveň vakua (cca. 10^{-7} torr) [1]. Toho je docíleno nejprve odsátím vzduchu při samotné výrobě a následným spálením zbytku kyslíku uvnitř baňky po zatavení skla. K tomuto „vypálení“ slouží tzv. getr (z angl. getter), což je malý kovový držák ve tvaru misky nebo kroužku, který obsahuje malé množství kovu (obvykle barya nebo jeho sloučenin). Zapálením se spotřebuje zbylý vzduch uvnitř baňky a v důsledku této reakce se na vnitřní straně skla objeví charakteristická stříbrná skvrna, která je současně ukazatelem stavu vakua uvnitř baňky. V případě vniku vzduchu se skvrna zbarví do běla, čímž se signalizuje znehodnocení funkce elektronky.

1.4 Princip

Základní princip bude vysvětlen na přímo žhavené diodě se dvěma anodami, jejíž schématickou značku je vidět na Obr. 4.

Začne-li se žhavit vlákno elektronky (vývody f a f, k) a současně je na anodu a společnou katodu (vývody a' a f, k) připojen napájecí zdroj, lze pozorovat, že tímto obvodem protéká elektrický proud.



Obr. 3 - Jednoduché zapojení diody v obvodu

Proud tvoří záporně nabitě částice (elektrony), které jsou emitovány z rozžhaveného vlákna tvořící katodu a přitahovány ke kladně polarizované anodě.

1.4.1 Žhavení

První elektronky fungovaly na principu přímého žhavení. Základ tvořilo žhavicí vlákno, které bylo zdrojem emitovaných elektronů a zároveň sloužilo i jako katoda (proto označení „přímo žhavená katoda“), nevýhodou však byly nízké emisní vlastnosti a proto se od tohoto typu žhavení částečně upustilo a dospělo se k dvěma druhům tzv. nepřímého žhavení s použitím

- thoriové katody (pro výkonové elektronky),
- katody s povrchem tvořeným oxidem barya a stroncia (pro malé elektronky).

Thoriová katoda při teplotách kolem 2400 °C vykazuje mnohem lepší termoemisní vlastnosti, než původně používané wolframové vlákno, jehož nevýhody spočívaly v rychlém rozprašování a nízké mechanické odolnosti, zatímco katoda z thoria má vysokou životnost a odolnost proti vysokému napětí. Katodu s povrchem tvořeným oxidem barya nebo stroncia není třeba žhavit

na tak vysoké teploty, typicky kolem 1000 °C. Nevýhodou je však náchylnost na vysoké napětí – z tohoto důvodu se používá pouze v menších a méně výkonných elektronkách.

U nepřímého žhavení je žhavicí vlákno odděleno od katody (princiální náčrtek viz Obr. 2), čímž se docílilo

1. možnosti galvanicky odděleného anodového zdroje proudu a zdroje žhavení,
2. vyšší termoemisní schopnosti,
3. vyšší životnosti elektronky (malá úroveň rozprašování katody).

Žhavicí vlákno je v tomto případě zdroj vyzařující tepelnou energii ve formě fotonů, které při dopadu na povrch katody excitují přítomné elektrony.

Z výše uvedených informací vyplývá, že stavebním kamenem funkce elektronek je již zmíněný fyzikální jev – termoemise. Zahříváním kovu se předává tepelná energie elektronům uvnitř kovových mřížek katody. Pokud tato dodaná energie překročí kritickou hranici výstupní práce elektronu z kovu, částice je emitována z materiálu a může se volně pohybovat prostorem. Tento jev popisuje Richardson-Dushmanův vztah [6]

$$j_s = A \cdot T^2 \cdot e^{\left(\frac{-W}{k \cdot T}\right)}, \quad (1)$$

$$A = \frac{4\pi \cdot m \cdot k^2 \cdot q}{h^3}, \quad (2)$$

kde j_s je hustota emisního proudu, A představuje Richardsonovu konstantu, T je teplota daného kovu, W je výstupní práce elektronu z kovu, k vyjadřuje Boltzmanovu konstantu, m a q je hmotnost a náboj elektronu a dále h značí Planckovu konstantu.

Na první pohled je zřejmé, že hustota emisního proudu j_s roste se čtvercem teploty kovu T , přičemž funkce elektronky zakládá právě na tomto fyzikálním jevu.

1.5 Rozdělení podle typu

Jak již bylo uvedeno, elektronky lze dělit podle typu žhavení nebo zdali se jedná o jednoduchou či dvojitou variantu uvnitř jednoho pouzdra. V praxi se však elektronky majoritně řadí do skupin s ohledem na počet elektrod (a tedy podle počtu řídicích mřížek), z čehož je odvozeno i jejich názvosloví, viz následující Tabulka 1.

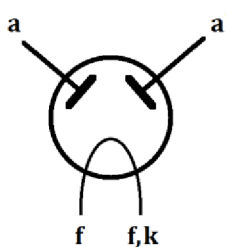
Pro své vlastnosti se v nízkofrekvenční audiotechnice nejčastěji využívá diod, triod a pentod. S ohledem na téma této práce proto budou následující odstavce věnovány popisu právě těmto zmíněným typům elektronek.

Tabulka 1 - Názvosloví elektronek

Počet mřížek	Název elektronky
0	Dioda
1	Trioda
2	Tetroda
3	Pentoda
4	Hexoda
5	Heptoda
6	Oktoda
7	Enneoda

1.5.1 Dioda

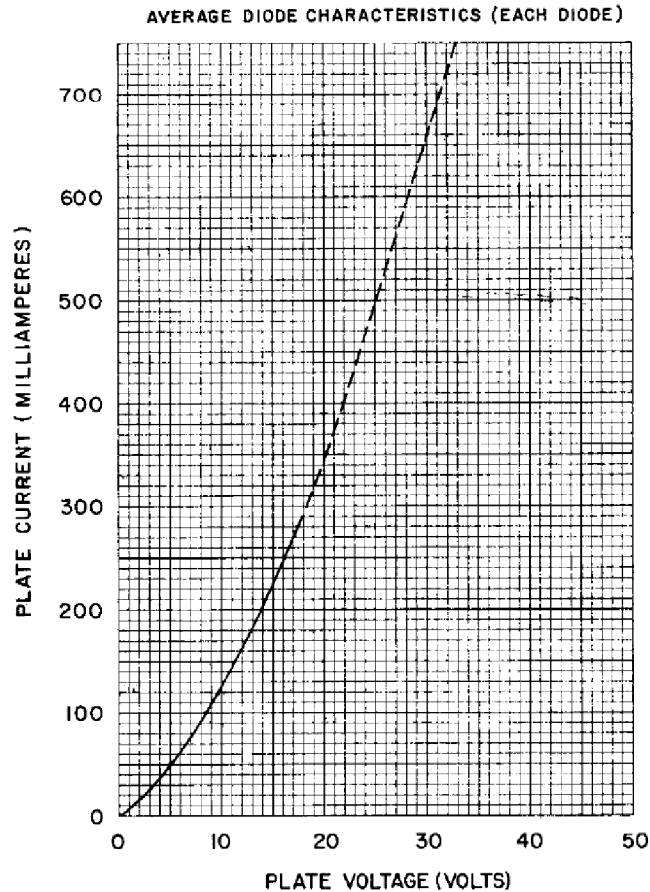
Jedná se o nejjednodušší typ elektronky, jejíž funkcí je usměrnění střídavého proudu. Dioda nedisponuje žádnými řídicími elektrodami, obsahuje pouze jednoduchou či dvojitou anodu a , a' a katodu k .



Obr. 4 - Přímě žhavená dioda

Dioda se nejčastěji vyrábí v provedení s dvojitou anodou a přímým žhavením, viz schematická značka na Obr. 4. Její provozní charakteristiku, tedy závislost výstupního napětí na výstupním proudu v zapojení s filtračním kondenzátorem, lze vidět na Obr. 5.

Běžnými zástupci této kategorie jsou například diody GZ34 a EZ81 (jiné označení 5AR4 a 6CA4).

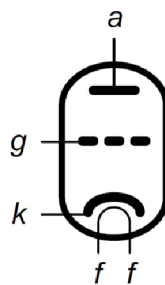


Obr. 5 - Provozní charakteristika diody GZ34 [7]

1.5.2 Trioda

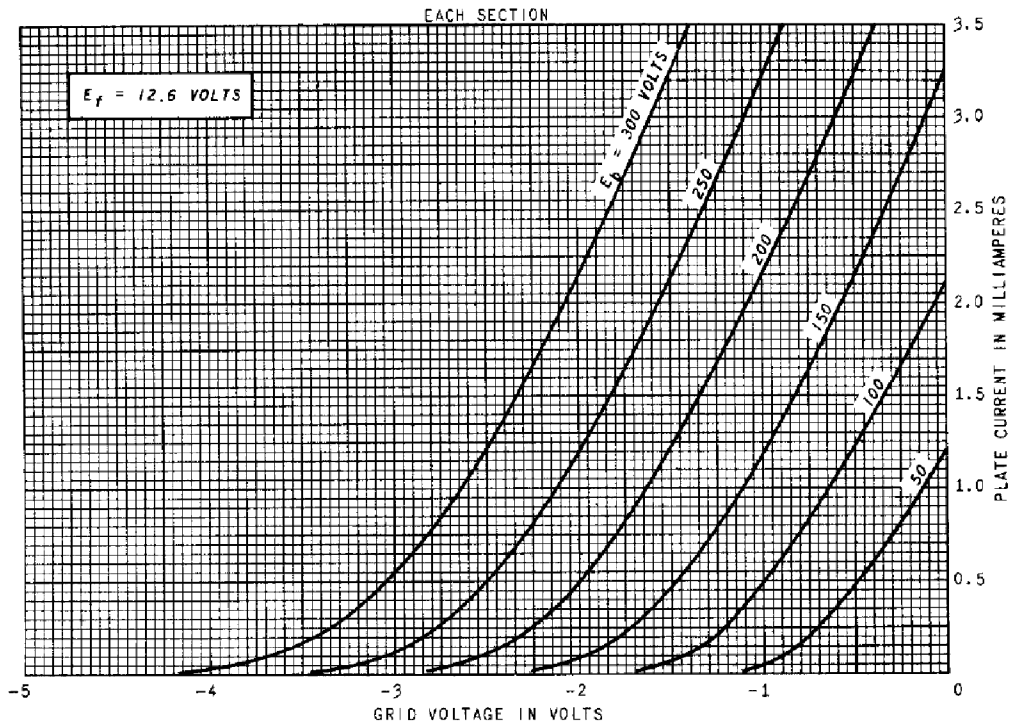
Jedná se o nejjednodušší zesilovací elektronku obsahující tři elektrody – anodu *a*, katodu *k* a mřížku *g*. Proud tekoucí mezi anodou a katodou lze regulovat mřížkou, která je vsazena mezi tyto dvě elektrody.

Stejně jako ostatní elektronky může být trioda žhavena přímo nebo nepřímo, často se vyrábí v dvojitém provedení (dvě triody v jediné skleněné baňce). Tradičními představiteli jsou např. ECC82, ECC83, ECC88 a ECC99 (zahraniční verze byly značeny také jako 12AT7, 12AU7, 12AX7 a 6922).

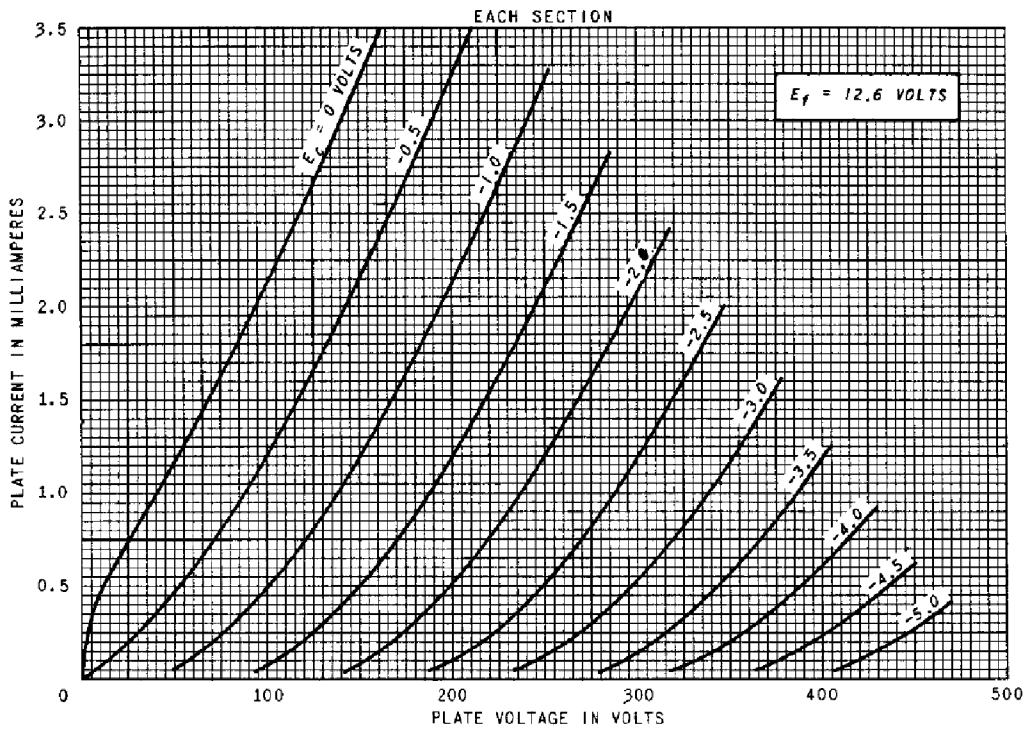


Obr. 6 - Trioda

Z hlediska popisu chování v obvodu se jedná o zdroj proudu řízený napětím na mřížce (malá změna vstupního napětí vyvolá velkou změnu anodového proudu). Chování triody určují dvě následující charakteristiky.



Obr. 7 - Převodní charakteristika triody ECC83 [8]



Obr. 8 - Anodová charakteristika triody ECC83 [8]

První graf (Obr. 7) zobrazuje závislost anodového proudu triodou I_a na nastaveném předpětí mřížky U_g při různých konstantních hodnotách anodového napětí U_a . Zde je sledovanou vlastností tvar křivky $I_a = f(-U_{g1})$, který prozrazuje míru linearitu dané elektronky.

Obr. 8 zobrazuje tzv. anodovou charakteristiku, která představuje závislost anodového proudu I_a na změně anodového napětí U_a při konstantních hodnotách napětí na mřížce U_g . Z těchto křivek lze vypočítat vnitřní odpor elektronky v daném bodě.

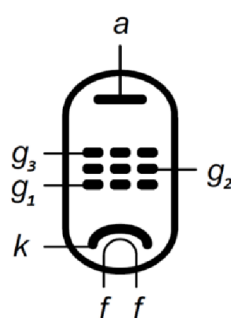
Zásadní vlastnost, v které má trioda navrch v porovnání s ostatními druhy elektronek, je její velmi nízké zkreslení, jelikož zde nedochází k sekundární emisi elektronů, jako například u tetrody a v omezené míře i u pentody. Za nevýhodu může být považován její relativně nízký vnitřní odpor, malá strmost [9], avšak zásadní nežádoucí vlastností je tzv. Millerův jev [10] (kapacita mezi anodou a mřížkou, která se dále násobí zesilovacím činitelem elektronky, způsobuje pokles celkového zesílení při rostoucí frekvenci).

1.5.3 Pentoda

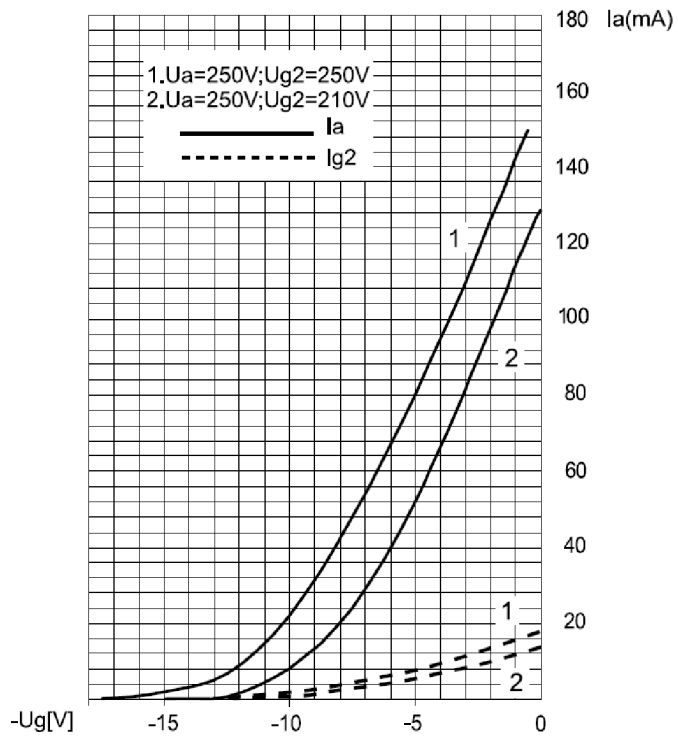
Běžně se vyskytující typ elektronky hlavně v koncových stupních kytarových zesilovačů. Pentoda má celkem 5 elektrod: anodu a , katodu k , řídicí mřížku g_1 , stínící mřížku g_2 a hradící neboli brzdící mřížku g_3 [11].

Pentoda byla vyvíjena již ve 20. letech minulé století souběžně s tetrodou. Důvodem k přidání v pořadí třetí mřížky bylo eliminovat velkou nečinnost tetrody – sekundární emisi elektronů. Tento jev byl způsoben přílišným urychlením elektronů stínící mřížkou g_2 , čímž elektrony, které byly emitovány z katody, při dopadu na anodu vyvolaly emisi několika dalších částic. Stínící mřížka se připojuje na vyšší kladné napětí a díky umístění těsně za řídicí mřížkou g_1 má podstatně větší vliv na tok elektronů než anoda.

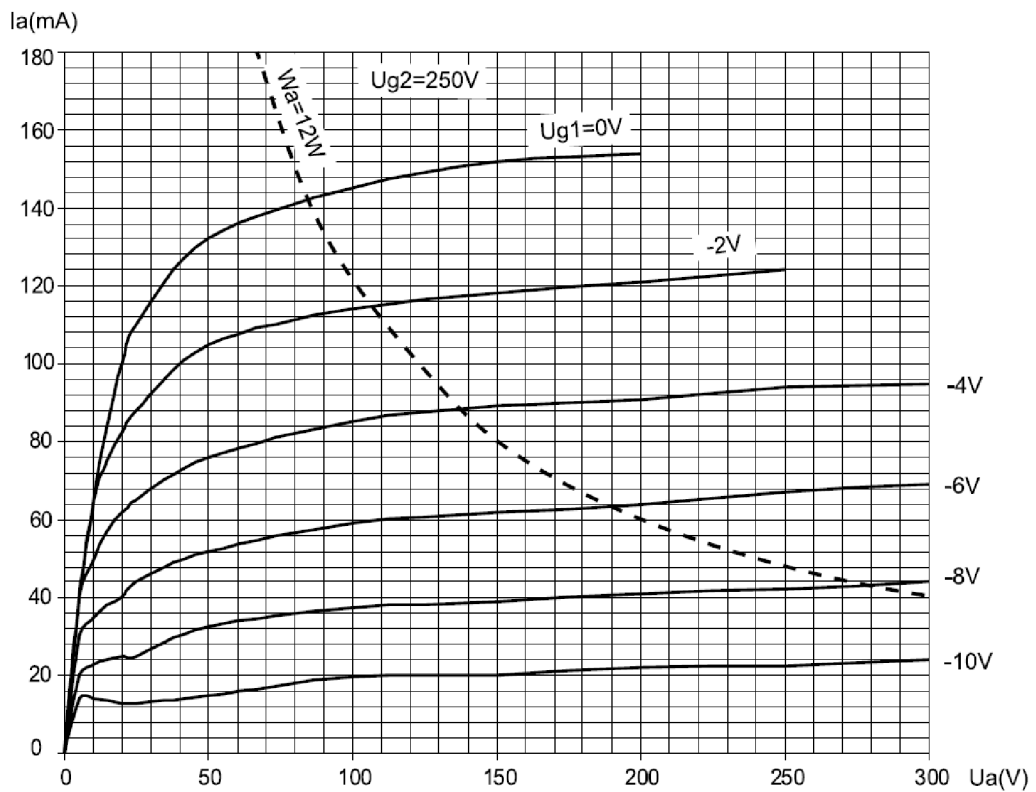
Úkolem třetí (hradící) mřížky g_3 je tedy vracet všechny vyražené sekundární elektrony zpět do anody. Proto se obvykle tato elektroda propojuje ke katodě, popř. k jinému zápornému potenciálu.



Obr. 9 - Pentoda



Obr. 10 - Převodní charakteristika pentody EL84 [12]



Obr. 11 - Anodová charakteristika pentody EL84 [12]

Na Obr. 10 je vyobrazena převodní charakteristika pentody. Tvary křivek triody i pentody jsou dosti podobné, hodnota strmosti je však u pentody mnohonásobně vyšší. Dále zde přibyla křivka znázorňující průběh proudu stínící mřížkou I_{g2} .

Anodová charakteristika na Obr. 11 již nese jisté změny – zatímco průběh u triody má pozvolný exponenciální nárůst, charakteristika pentody má charakteristický tvar kolena, podobně jako u tranzistoru.

Nejčastěji používané pentody, které lze často nalézt v konstrukcích koncových stupňů jsou např. EL34, EL84, 6CL6 nebo 6F6.

1.6 Dynamické parametry

Vlastnosti elektronek pro malé změny signálu popisuje několik diferenciálních parametrů, které lze buď nalézt v technickém dokumentu součástky, nebo je určit podle následujících vztahů.

Strmost S (angl. slope) je dána poměrem změny anodového proudu ΔI_a a přírůstku mřížkového napětí ΔU_g při konstantním anodovém napětí U_a . Hodnota strmosti je uváděna v [mA/V].

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}, \quad U_a = \text{konst.} \quad (3)$$

Vnitřní odpor R_i se určuje jako poměr přírůstku anodového napětí ΔU_a a anodového proudu ΔI_a při neměnné hodnotě mřížkového napětí U_g . V praxi se často hodnota vnitřního odporu udává v [k Ω].

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}, \quad U_g = \text{konst.} \quad (4)$$

Zesilovací činitel μ (angl. amplification factor) udává poměr změny anodového napětí ΔU_a ke změně napětí na mřížce ΔU_g při konstantním anodovém proudu I_a .

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}, \quad I_a = \text{konst.} \quad (5)$$

Průnik D (angl. penetrance) uvádí převrácenou hodnotu zesilovacího činitele μ .

$$D = \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

Pro daný pracovní bod elektrony platí tzv. Barkhausenův vztah [1]. Vynásobením trojice odpovídajících parametrů strmosti S , vnitřního odporu R_i a průniku D lze obdržet, že

$$S \cdot R_i \cdot D = 1. \quad (7)$$

1.7 Ostatní parametry

Další parametry daného typu elektronky, které lze nalézt v datovém listu výrobce jsou např.

- anodová ztráta W_a (určující maximální výkon elektronky),
- kapacita mezi jednotlivými elektrodami $C_a, C_{g/k}, C_{g/a}$,
- hodnota napětí a proudu žhavení elektronky U_f, I_f ,
- maximální napěťový potenciál mezi žhavením a katodou (Heater - Cathode Voltage),
- rozměry součástky,
- počet vývodů, typ jejich rozmístění (oktal, noval) a schématické zapojení.

Charakteristické jsou svou technickou rozsáhlostí starší datové listy výrobce General Electric, které kromě výše uvedených údajů také dále zmiňují chování elektronky ve stanoveném zapojení. V tabulkách lze např. vyčíst doporučené nastavení pracovního bodu pro funkci v třídě A nebo hodnotu zesílení, pokud je daná elektronka zapojena dle schématu s konkrétními hodnotami rezistorů a při daném napájecím napětí, což jsou velmi užitečné informace, pokud není obvod zrovna realizován fyzicky a tudíž i důležité hodnoty nelze jednoduše odvodit či změřit.

2 Zapojení zesilovače s elektronkou

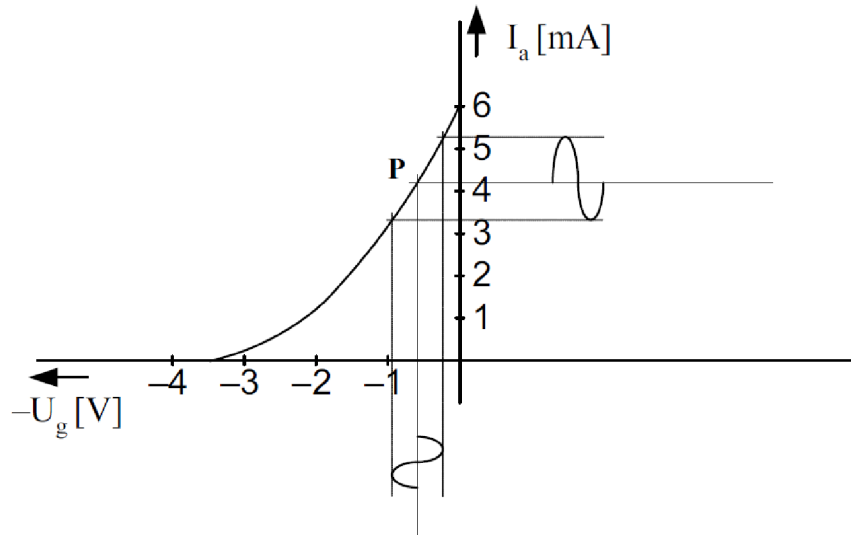
V této kapitole bude vysvětlen princip nastavení pracovního bodu elektronky, z něhož se odvíjí i rozdělení do daných zesilujících tříd a také možnosti zapojení této součástky v obvodu.

2.1 Třídy zesilovačů

Rozdělení elektronky jako zesilovače v dané třídě určuje zvolené klidové předpětí mřížky a tedy i klidový proud. V následujících podkapitolách bude stručně popsán každý typ třídy s pomocí převodních charakteristik (závislost $I_a = f(U_g)$).

2.1.1 Třída A

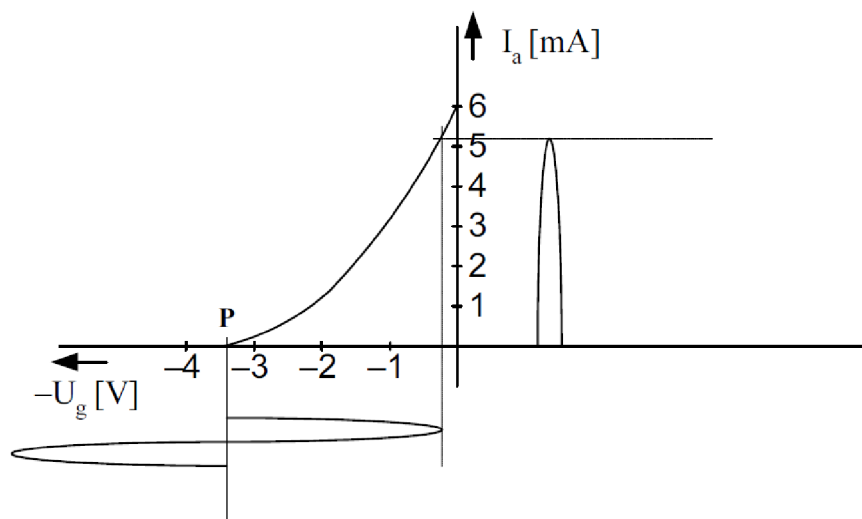
Základem této třídy je vhodně zvolený pracovní bod P (předpětí mřížky U_g), přičemž rozkmit vstupního signálu U_g by se měl pohybovat po lineární části charakteristiky tak, aby zesílené výstupní napětí U_a bylo bez patrného zkreslení (Obr. 12). Z charakteristiky vyplývá, že ke zpracování signálu je zapotřebí pouze jedné elektronky, která zesiluje jak kladnou tak i zápornou půlvlnu. Zásadní výhodou této techniky spočívá v onom nízkém zkreslení, čehož je využíváno hlavně v nízkofrekvenční audiotechnice. Naopak nevýhodou tohoto řešení vyplývá právě z nastavení pracovního bodu. V klidovém stavu elektronkou protéká určitý – ztrátový proud, který snižuje celkovou účinnost a při vyšších výkonech se stává velmi nepříznivou vlastností.



Obr. 12 - Třída A [1]

2.1.2 Třída B

Pro zesílení signálu je zapotřebí dvou elektronek, kdy první zesiluje kladnou část půlvlny a druhá zápornou část. V klidovém stavu elektronkami neprotéká žádný proud, až při připojení vstupního signálu začne některá z páru pracovat (v závislosti na aktuální polaritě signálu). Podstatnou výhodou zapojení je vysoká účinnost, kdy spotřebovaná energie slouží hlavně k zesílení vstupního signálu a obvod lze tedy využít i pro vyšší výkony. Nevýhoda však spočívá ve velkém zkreslení dané nelinearitou elektronek při vyšším mřížkovém předpětí U_g a také přechodem při změně polarity (tzv. přechodové zkreslení). Dále je nutné, aby obě součástky měly shodné parametry (tzv. párovaná dvojice).

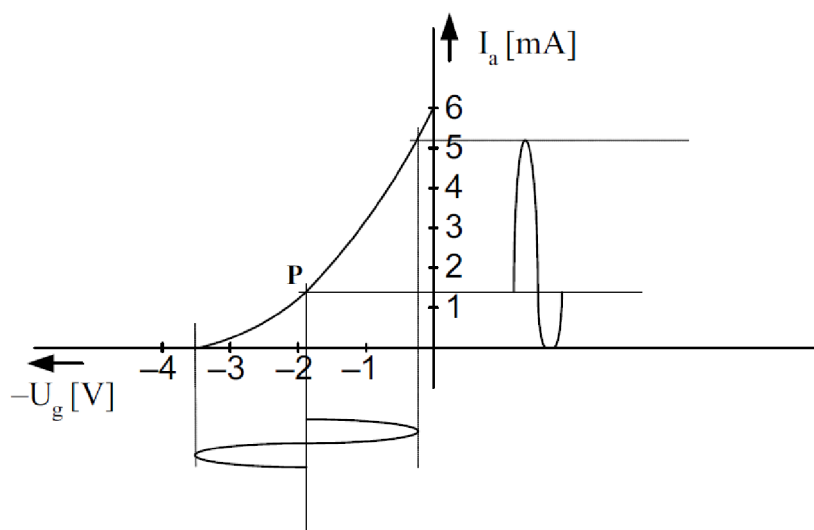


Obr. 13 - Třída B [1]

2.1.3 Třída AB

Kompromisem mezi třídami A a B, kdy první je založena na absolutní kvalitě a druhá na absolutní efektivitě, bylo spojení jejich předností, z čehož vznikla třída AB. V tomto zapojení se užívá, stejně jako v třídě B, dvou elektronek, kdy každá zesiluje buď kladnou, nebo zápornou půlvlnu signálu. Vhodným nastavením pracovního bodu P se snížil i klidový proud. Při přiložení vstupního signálu se daná (např. kladná) část půlvlny pohybuje pouze po lineární části charakteristiky a záporná část je již zesílena se značným zkreslením. Princip třídy AB spočívá v „protitaktním“ propojení páru elektronek, kdy se zesílený výstupní signál skládá pouze z těchto dvou lineárních částí.

Výhodou zapojení je relativně nízké zkreslení, které není vykoupeno nízkou účinností, avšak je vyšší, než u třídy A. Nevýhodou je také nutnost použití dvou elektronek se shodnými parametry.



Obr. 14 - Třída AB [1]

2.2 Základní stupně s elektronkami

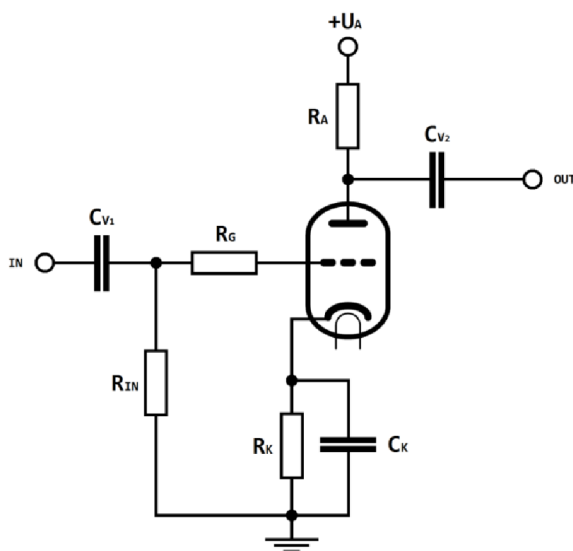
Kromě zesilující třídy je rozlišován i způsob zapojení v obvodu, z něhož částečně vyplývají vlastnosti daného zapojení, např. napěťové zesílení, výstupní odpor aj. V následujících podkapitolách budou vysvětleny dva základní typy zapojení a jejich princip funkce.

2.2.1 Zapojení se společnou katodou

Jedná se o nejčastější způsob zapojení zesilujícího stupně (Obr. 15). Signál přivedený na svorku **IN** prochází přes vazební kondenzátor C_{V1} a rezistor R_G do řídicí mřížky triody. Rezistor R_{IN} určuje vstupní impedanci stupně (vstupní impedance triody je nesrovnatelně vyšší, proto se zanedbává) a zároveň s kondenzátorem C_{V1} funguje jako filtr typu horní propust, přičemž mezní frekvence f_M se vypočítá jako

$$f_M = \frac{1}{2\pi \cdot C_{V1} \cdot R_{IN}} \quad (8)$$

Rezistor R_K určuje předpětí mřížky a současně také nastavuje pracovní bod elektronky. Ten je však blokován kondenzátorem C_K , čímž je zvýšen celkový zisk stupně pro střídavé signály. Jeho velikost musí být dostatečně velká (jednotky až stovky μF), aby nadbytečně neovlivňoval přenosovou frekvenční charakteristiku při nízkých kmitočtech [13]. Rezistor R_A nastavuje potřebný napěťový úbytek (určuje se podle požadovaného anodového napětí a proudu), současně ale také ovlivňuje zesílení a vnitřní odpor stupně. Kondenzátor C_{V2} slouží k stejnosměrnému oddělení stupňů nebo zátěže, není však nutnou součástí obvodu.



Obr. 15 - Zapojení se společnou katodou

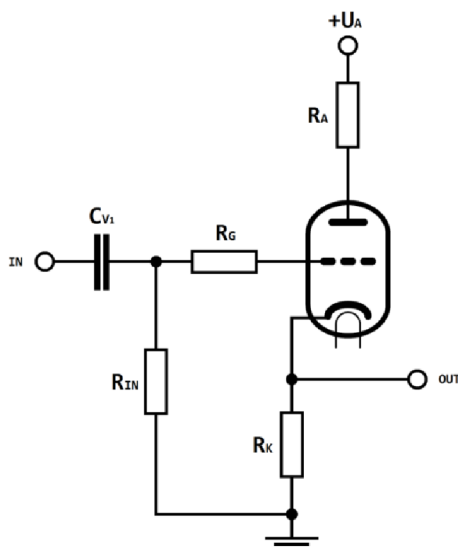
Výhoda zapojení se společnou katodou spočívá v nízké až středně velké výstupní impedanci (jednotky až desítky $\text{k}\Omega$), v relativně vysokém zisku a také v dobré frekvenční odezvě [13], kterou lze značně ovlivnit blokovacími a oddělovacími kondenzátory. Důležité je také zmínit, že tento zesilovač invertuje fázi signálu.

2.2.2 Zapojení se společnou anodou

Obvod se velmi podobá předchozímu zapojení, nachází se zde však změna v zapojení výstupu, který je připojen ke katodě.

Jednoduché zapojení triody se společnou anodou je vidět na Obr. 16. Pokud se zvýší velikost vstupního signálu např. o 1 V, zvýší se i anodový proud, tekoucí elektronkou, což má za následek zvýšení úbytku napětí na rezistoru R_K (v ideálním případě o 1 V). V souvislosti s tímto se však nemění pracovní bod, který určuje právě napětí mezi katodou a mřížkou. Odtud také pochází alternativní název - katodový sledovač (angl. cathode follower) [14].

Napěťové zesílení v ideálním případě je rovno jedné ($A_U = 1$), ve skutečnosti je však vždy menší než jedna ($A_U < 1$) [14]. Z tohoto zapojení také vyplývá, že výstupní signál je ve fázi se vstupním (neinvertující zapojení).



Obr. 16 - Zapojení se společnou anodou

3 Návrh

Zařízení, navrhované v této bakalářské práci, bude sloužit jako zesilovač pro sluchátka Sennheiser HD 650, jejichž parametry shrnuje následující tabulka.

Tabulka 2 - Technické parametry sluchátek Sennheiser HD 650 [15]

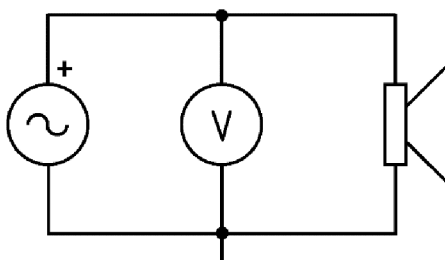
Frekvenční odezva	16 – 30.000 Hz (-3 dB)
	10 – 39.500 Hz (-10 dB)
Nominální impedance	300 Ω
Akustický tlak při frekvenci 1 kHz	103 dB (1 V _{RMS})
Dlouhodobý max. příkon	500 mW (EN 60-268-7)
THD	≤ 0,05 %

Z údajů nominální impedance a maximálního dlouhodobého příkonu lze nyní vypočítat maximální přípustnou hodnotu napájecího napětí sluchátek jako

$$P = \frac{U^2}{Z} \rightarrow U = \sqrt{P \cdot Z}. \quad (9)$$

Sluchátka byla podrobena kontrolnímu měření závislosti impedance měničů na frekvenci v celém slyšitelném spektru 20 Hz - 20 kHz. Signál napájející měniče měl sinusový průběh o amplitudě 1 V_{RMS}. K testu byl použit funkční generátor Agilent 33521A disponující funkcí plynule nastavitelné

impedance zátěže a multimetr Agilent 34401A pro měření hodnoty střídavého napětí. Následující obrázek zobrazuje schéma zapojení pro dané měření.

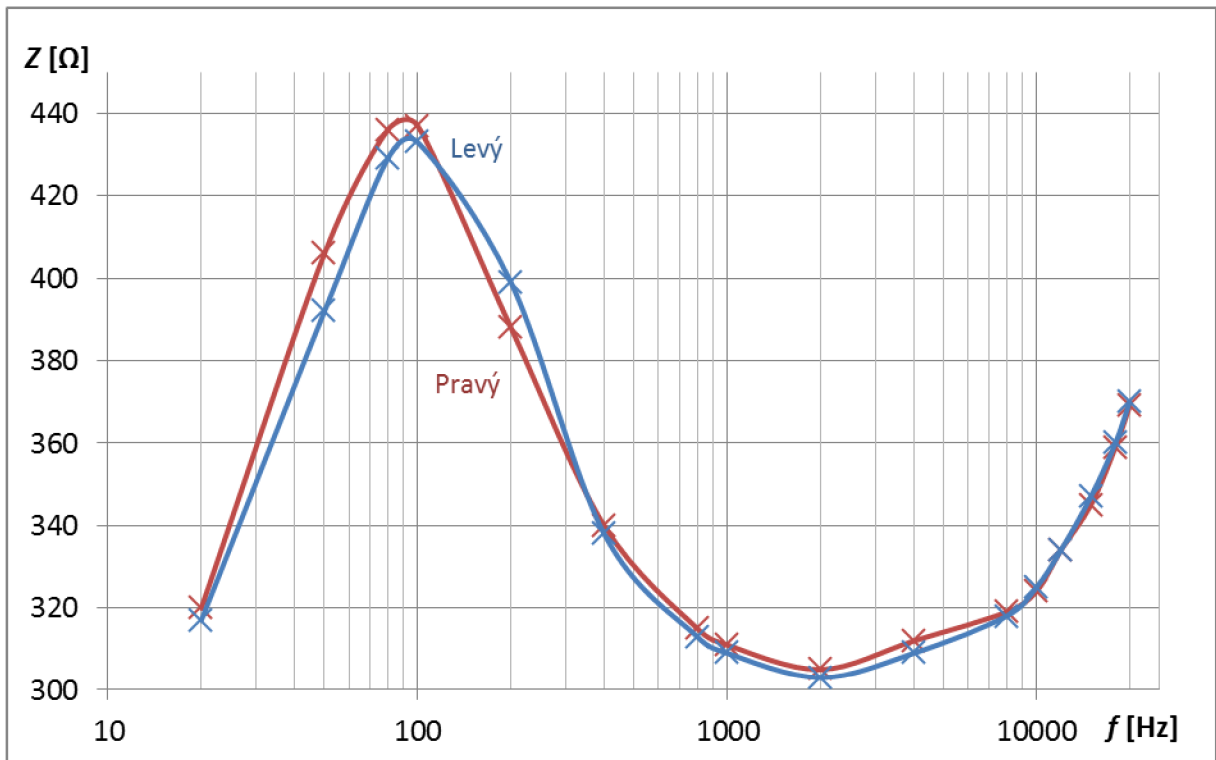


Obr. 17 - Měření impedance sluchátek

Zdroj signálu i voltmetr jsou napřímo připojeny k některému z dvojice měničů. Při aktivaci výstupu generátoru a nastavení požadované frekvence (např. 20 Hz) má zátěž určitou neznámou impedanci. Jelikož je tato hodnota odlišná s nastavenou na generátoru (např. High Z), amplituda signálu udávaná generátorem není pravdivá. Proto se ohmická hodnota zátěže na generátoru dále upravuje, dokud se velikost napětí měřícího signálu, kterou přístroj přepočítává, neshoduje s naměřenou hodnotou na voltmetru. Při dosažení shodných údajů je nastavená impedance zátěže rovna impedanci měniče.

Tabulka 3 - Naměřené hodnoty impedance sluchátek v závislosti na frekvenci

Levý kanál		Pravý kanál	
f [Hz]	Z [Ω]	f [Hz]	Z [Ω]
20	317	20	320
50	392	50	406
80	429	80	436
100	433	100	437
200	399	200	388
400	338	400	340
800	313	800	315
1000	309	1000	311
2000	303	2000	305
4000	309	4000	312
8000	318	8000	319
10000	325	10000	324
12000	334	12000	334
15000	347	15000	345
18000	360	18000	359
20000	370	20000	369



Obr. 18 - Závislost impedance sluchátek na frekvenci

Nominální impedance sluchátek je v tomto případě 303Ω při frekvenci 2 kHz. Znalost tohoto parametru je důležitá pro stanovení maximálního napájecího napětí, jehož výpočet je uveden v rovnici (9). Dosazením hodnot do výpočetního vztahu

$$U_{MAX} = \sqrt{P \cdot Z} = \sqrt{0,5 \cdot 300} = 12,247 \text{ V}_{RMS} . \quad (10)$$

Této hodnotě odpovídá akustický tlak

$$SPL_{MAX} = 20 \cdot \log \frac{U_{MAX}}{U_{REF}} = 20 \cdot \log \frac{12,247}{1} = 21,76 \text{ dB} . \quad (11)$$

Vypočtený akustický tlak SPL_{MAX} se však vztahuje k rozmezí 1 V_{RMS} až $12,247 \text{ V}_{RMS}$, proto je nutné tuto hodnotu ještě přičíst k výrobcem udávanému akustickému tlaku SPL při napětí 1 V_{RMS} [15]

$$SPL = SPL_{1V} + SPL_{MAX} \doteq 103 + 21,8 = 124,8 \text{ dB} . \quad (12)$$

Výsledky tedy udávají, že při vybuzení sluchátek k maximálnímu možnému výkonu vyprodukují zvuk o hlasitosti 124,8 dB, což je téměř o 5 dB více než je práh bolesti.

Pro zachování zdravého sluchu posluchače a pro předejití možného poškození měničů, bude amplituda napájecího signálu omezena na maximálně $4 V_{RMS}$, což odpovídá hlasitosti

$$SPL = SPL_{1V} + SPL_{4V} = 103 + 20 \cdot \log(4) \doteq 103 + 12 = 115 \text{ dB}. \quad (13)$$

To zajišťuje stále plně dostačující dynamický rozsah (tzv. headroom) a současně chrání sluchátka před výkonovým přetížením.

3.1 Návrh předzesilovače

Pro konstrukci prvního stupně zesilovače bylo vybíráno z několika typů elektronek.

Tabulka 4 - Návrhová tabulka elektronek vhodných pro předzilovač [8], [17], [19]

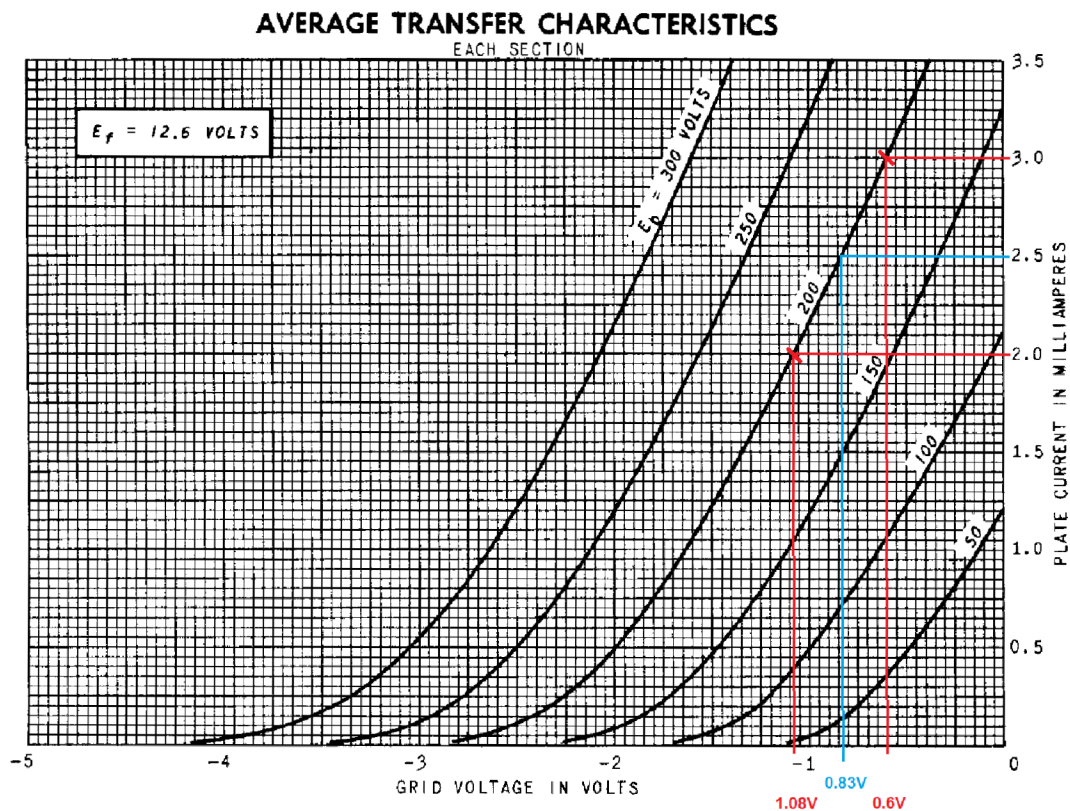
	ECC81	ECC83	ECC88
Žhavicí napětí U_F [V]	6,3/12,6	6,3/12,6	6,3
Provozní rozsah napětí U_A [V]	170 - 250	100 - 300	90 - 130
Maximální proud I_A [mA]	15	3,5	25
Typická strmost S [mA/V]	5,5	1,6	12,5
Maximální činitel zesílení μ [-]	60	100	33
Maximální výkon W_A [W]	2,5	1	1,5

Pro předzesilovač v tomto návrhu byla vybrána elektronka ECC83 disponující velkým činitelem zesílení μ , dostačující anodovou ztrátou W_A a také možností žhavení napětím 6,3 V nebo 12,6 V.

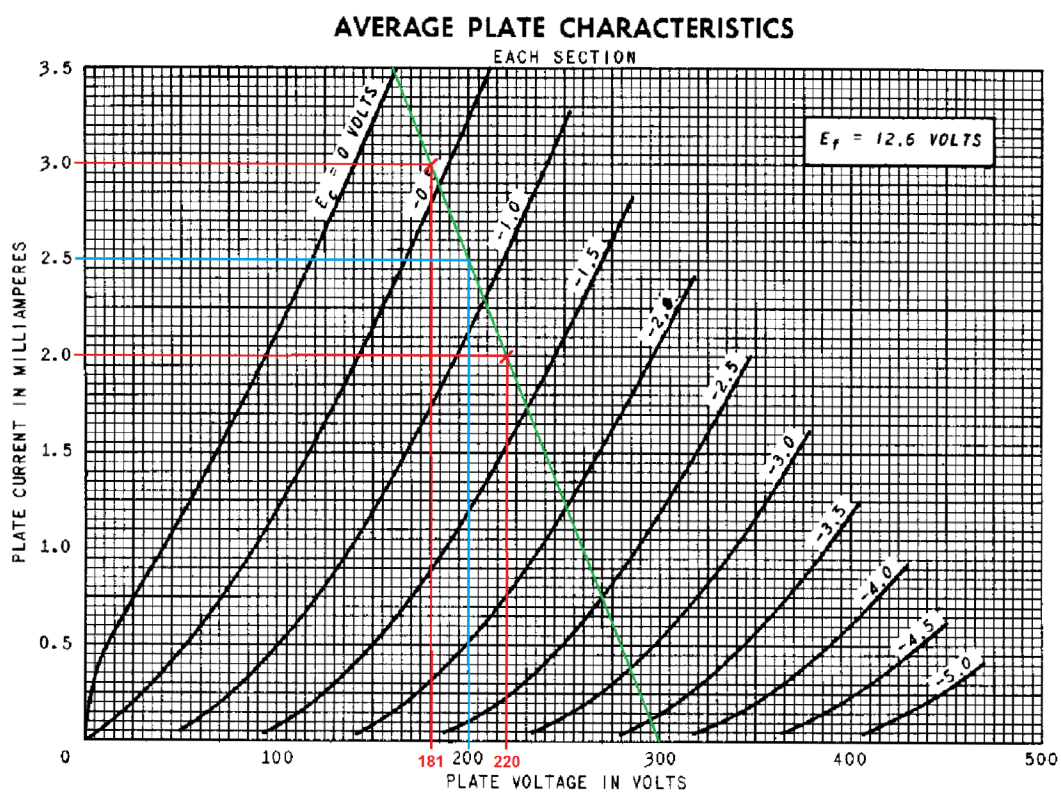
Z datového listu výrobce lze vyčíst, že reálná hodnota zesílení elektronky μ se pohybuje v rozmezí 31 až 71 v závislosti na anodovém napětí a hodnotě zatěžovacího rezistoru R_A [8]. Za použití převodní charakteristiky byl stanoven pracovní bod elektronky, který je vyznačen na Obr. 19.

Modře zbarvené úsečky stanovují umístění pracovního bodu, což odpovídá trojici parametrů: anodové napětí $U_A = 200$ V, mřížkové předpětí $U_G = -0,83$ V a anodový proud $I_A = 2$ mA. Maximální předpokládaný rozkmit vstupního signálu je tedy $\pm 0,48 V_{pp}$, což odpovídá změně anodového proudu ± 1 mA (ohraničeno červenými úsečkami).

Tomu odpovídá i změna anodového napětí, vyjádřena grafem na Obr. 20. Zde je vynesena zatěžovací přímka (zeleně), která prochází bodem napětí naprázdno 300 V a pracovním bodem elektronky. Při rozmitání vstupního signálu se mění anodový proud I_A , čímž se pohybuje pracovní bod elektronky po této zatěžovací přímce. Výsledkem grafické metody je určení amplitudy výstupního signálu, která má při tomto nastavení velikost $39 V_{pp}$.

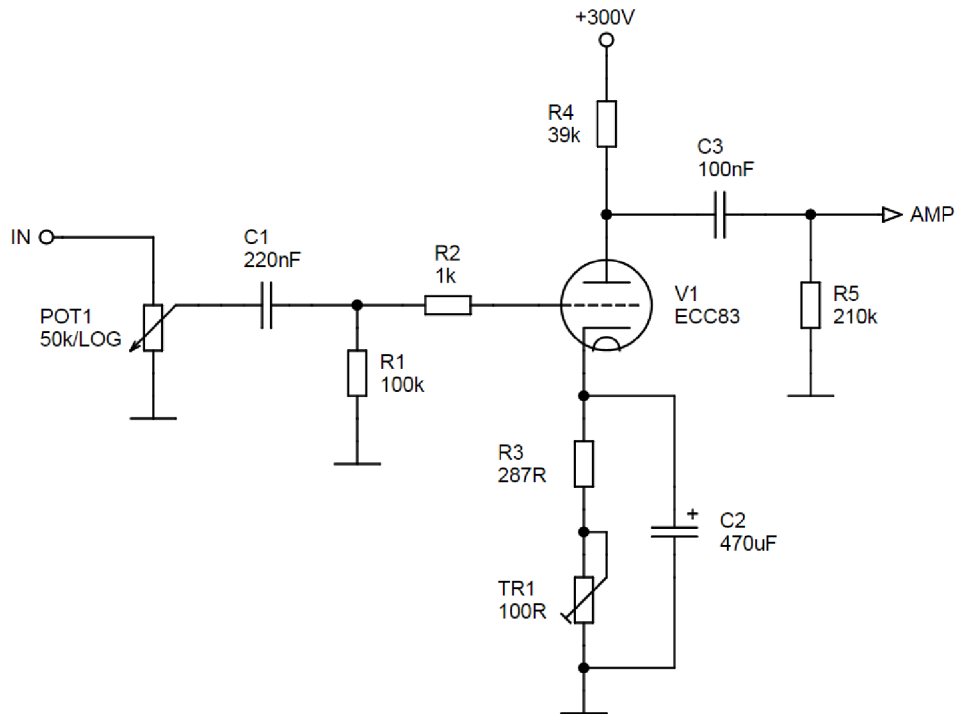


Obr. 19 - Nastavení pracovního bodu ECC83 (převodní charakteristika) [8]



Obr. 20 - Nastavení pracovního bodu ECC83 (anodová charakteristika) [8]

Samotný schématický návrh obvodu prvního stupně (předzesilovače) lze vidět níže na Obr. 21.



Obr. 21 - Schéma zapojení předzesilovače

Vstup tvoří potenciometr k ovládání hlasitosti o velikosti 50 kΩ s logaritmičtým průběhem. Přivedený signál vstupuje do obvodu přes frekvenční filtr, který tvoří vazební kondenzátor C1 a rezistor R1. Mezní frekvence horní propusti se vypočítá jako

$$f_{M_{IN}} = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 \cdot R_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 220 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 10^3} \doteq 7,23 \text{ Hz.} \quad (14)$$

Dále už signál pokračuje přes rezistor R2, který zabraňuje možným oscilacím elektronky, na řídicí mřížku triody.

Pracovní bod elektronky ECC83 je dán parametry $U_{AK} = 200 \text{ V}$, $I_A = 2,5 \text{ mA}$, $U_K = -U_G = 0,83 \text{ V}$. Při známém napájecím napětí tedy platí, že

$$R_4 = \frac{U_{NAP} - U_{AK} - U_K}{I_A} = \frac{300 - 200 - 0,83}{2,5 \cdot 10^{-3}} \doteq 39,67 \text{ k}\Omega, \quad (15)$$

kde U_{NAP} značí velikost napájecího napětí, U_{AK} udává napětí mezi anodou a katodou elektronky, U_K je katodové napětí a I_A je anodový proud. Hodnotu zatěžovacího rezistoru R4 lze bez problému volit o málo nižší - např. z řady E12, tedy 39 kΩ. Návrh dále pokračuje výpočtem velikosti katodového rezistoru, kde

$$R_3 = \frac{U_K}{I_A} = \frac{0,83}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 332 \Omega. \quad (16)$$

Rezistor R3 se ve značné míře podílí na nastavení pracovního bodu a i malá změna velikosti tohoto odporu vyvolá velký pohyb pracovního bodu. Z tohoto důvodu byl do série k R3 přidán víceotáčkový trimr velikosti 100 Ω pro přesné nastavení. Pro zvýšení zesílení je paralelně k rezistoru R3 v sérii s trimrem připojen blokovací kondenzátor C2. Ten se pro stejnosměrný model obvodu nijak neprojevuje, avšak pro střídavý signál se chová jako nízká impedance, čímž snižuje vnitřní odpor, mění střídavý pracovní bod a také sériovým zapojením ke kapacitě $C_{g/k}$ mezi mřížkou g a katodou k v omezené míře redukuje vliv Millerova efektu. Velikost kondenzátoru C2 je

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot f_M \cdot R_{OUT}}, \quad (17)$$

kde f_M udává minimální požadovanou mezní frekvenci a R_{OUT} je výstupní odpor prvního stupně zesilovače. Nejprve je však třeba jej vypočítat [20]

$$R_{OUT} = \frac{R_4 \cdot R_i}{R_4 + R_i} = \frac{39000 \cdot 50000}{39000 + 50000} = 21,91 \text{ k}\Omega. \quad (18)$$

Ze známé hodnoty výstupního odporu stupně R_{OUT} lze nyní vypočítat potřebnou velikost kondenzátoru C2. Mezní frekvence je volena shodná, jako u vstupního filtru (7,23 Hz), tudíž

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot f_M \cdot R_{OUT}} = \frac{1}{2\pi \cdot 7,23 \cdot 21910} \doteq 1 \mu\text{F}. \quad (19)$$

Vzhledem k velikosti C2 bude vhodnou volbou elektrolytický typ kondenzátoru. Dále s ohledem na vlastnosti elektrolytů (relativně nízká doba života, ale i nízká cena), byla vybrána hodnota 470 μF, která zajistí, že nebude ovlivňovat frekvenční charakteristiku stupně i přes postupně klesající kapacitu se stárnutím kondenzátoru. Napěťové zesílení prvního stupně [20] se vypočítá následovně

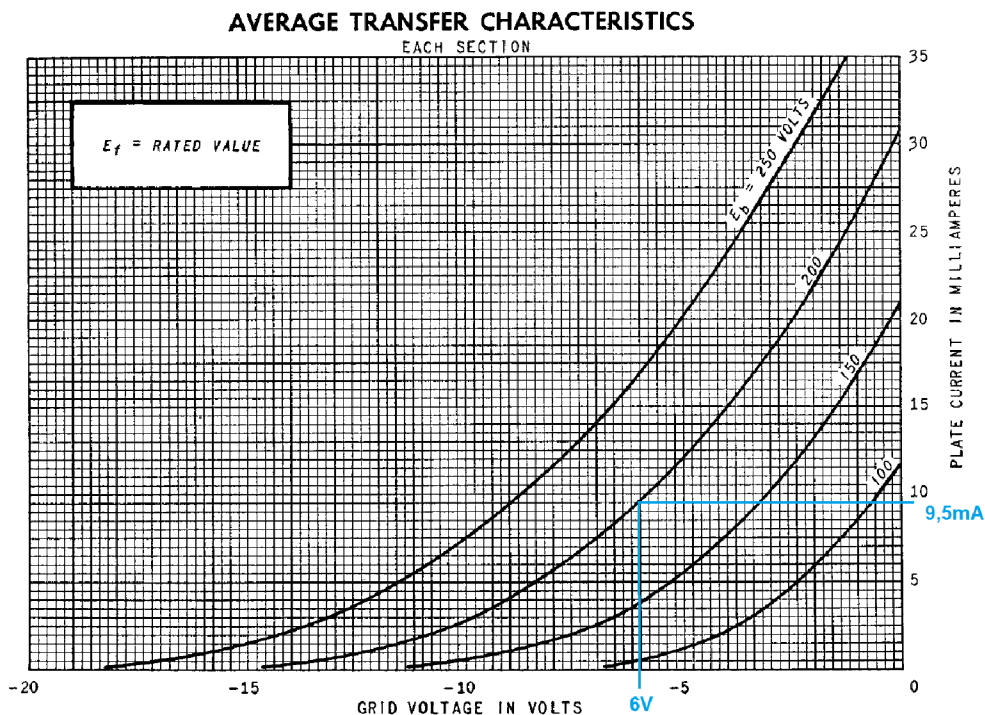
$$A_U \cong -\mu \cdot \frac{R_A}{R_A + R_i} = -100 \cdot \frac{39000}{39000 + 50000} = -43,82, \quad (20)$$

kde μ je činitel zesílení dané elektronky, R_A udává hodnotu anodového rezistoru a R_i je vnitřní odpor triody (parametry μ a R_i specifikuje výrobce v datovém listu elektronky). Výpočetní vztah je zjednodušen o uvažování parazitních kapacit a připojené zátěže na výstupu zesilovače. Reálné zesílení je tedy o málo nižší, v případě tohoto zapojení se $A_U = -40$. Zesílený signál dále pokračuje přes derivační členek do druhého, koncového, stupně. Mezní frekvence CR článku je

$$f_{MOUT} = \frac{1}{2\pi \cdot C_3 \cdot R_4} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot 210 \cdot 10^3} \doteq 7,58 \text{ Hz}. \quad (21)$$

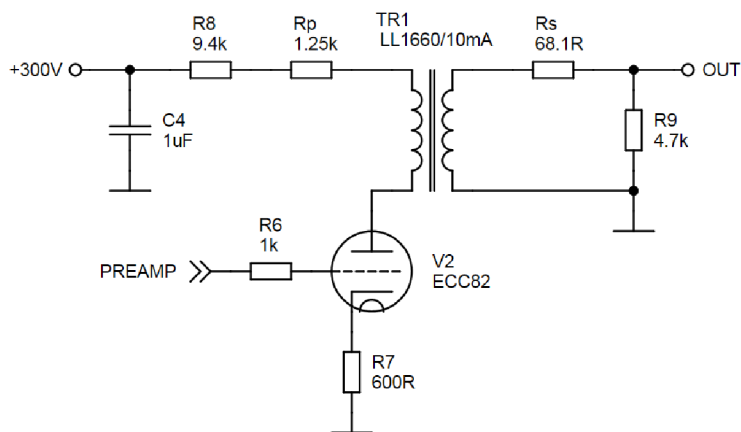
3.2 Návrh koncového stupně

Pro konstrukci v pořadí druhého stupně byla vybrána elektronka ECC82 pro její dostatečně velkou anodovou ztrátu $W_A = 2,75 \text{ W}$, variabilní žhavicí napětí $U_f = 6,3/12,6 \text{ V}$ [18] a hlavně výhodné umístění pracovního bodu (viz dále). Převodní charakteristika včetně umístění pracovního bodu je zobrazena na Obr. 22.



Obr. 22 - Převodní charakteristika elektronky ECC82

Pracovní bod je nastaven mřížkovým předpětím U_G o hodnotě -6 V, což při anodovém napětí $U_A = 200 \text{ V}$ způsobí, že triodou bude protékat pracovní proud I_A o velikosti 9,5 mA. Schéma zapojení koncového stupně lze vidět na Obr. 23.



Obr. 23 - Schéma zapojení koncového stupně

Rezistory R7 a R8 nastavují pracovní bod elektronky ECC82, kde

$$R_7 = \frac{U_K}{I_A} = \frac{6}{10 \cdot 10^{-3}} = 600 \Omega, \quad (22)$$

$$R_8 = \frac{U_{NAP} - U_{AK} - U_K}{I_A} = \frac{300 - 200 - 6}{10 \cdot 10^{-3}} = 9,4 \text{ k}\Omega. \quad (23)$$

Rezistory R_p a R_s představují stejnosměrný odpor primární, resp. sekundární cívky. Rezistor R9 slouží jako malá zátěž pro sekundární vinutí kvůli zamezení poškození transformátoru vlivem otevřené smyčky sekundárního obvodu, což může vést až k průrazu mezi závity, popř. i oběma vinutími. Fóliový kondenzátor C4 filtruje naindukované rušení na přívodních vodičích - pro jeho účinnou funkci je vhodné jej umístit co nejbližší k vývodům patice elektronky.

V praxi by měl koncový stupeň výkonově zesilovat přivedený signál a řídit jím připojenou zátěž. Navrhovaný stupeň, tvořený elektronkou ECC82, zesiluje pouze napětově a zatížením výstupu impedancí 300Ω (cca. $25\times$ nižší než má koncový stupeň) by byl zesilovač natolik zatížen, že by zesílení kleslo na nevyhovující úroveň. Proto je na výstupu zesilovače použit převodní transformátor Lundahl LL1660/10mA, který má za úkol

1. impedančně přizpůsobit koncový stupeň k zátěži,
2. ve výhodném poměru snížit amplitudu zesíleného signálu,
3. stejnosměrně oddělit zátěž v podobě sluchátek od zesilovače pracující ve třídě A.

Výrobce v katalogu uvádí několik variant použití, např. jako oddělovací mezistupeň pro kombinace elektronkových zapojení typu Push-Pull a Single-End, ale také i jako výstupní transformátor (Line Out) pro tyto obvody [21]. V doporučeném zapojení (Alt Q) má transformátor tyto parametry

Tabulka 5 - Parametry transformátoru Lundahl LL1660/10mA (zapojení Alt Q) [21]

Převodní poměr	4.5 : 1
Primární stejnosměrný proud pro saturaci 0.9 T	10 mA
Indukčnost primárního vinutí	180 H
Frekvenční odezva (± 1 dB)	11 Hz - 35 kHz
Maximální výstupní napětí při 30 Hz	57 V _{RMS}

Jak si lze všimnout, transformátor je schopný pracovat, i když jím prochází stejnosměrný proud (u tohoto typu až 10 mA pro dosažení poloviční saturace jádra). Díky této vlastnosti je možné použít transformátor jako výstupní i pro zesilovače, pracující ve třídě A. Současně je to i důvod k využití elektronky ECC82, jejíž doporučený pracovní bod se pohybuje právě na této hodnotě proudu [18].

Stejnou měrou odpor cívky primárního vinutí R_p je 1,25 k Ω . Vřazením transformátoru do obvodu se o málo sníží protékající proud (cca. o 0,5 mA), což je naopak výhodné, protože anodový pracovní proud bude pod hranicí 10 mA a současně nebude jádro transformátoru nad polovinou své maximální saturace (tedy méně jak 0,9 T).

Zesílení koncového stupně [20] se vypočítá následovně

$$r_A = R_i + R_K \cdot (\mu + 1) = 7600 + 600 \cdot (17,5 + 1) = 18,7 \text{ k}\Omega, \quad (24)$$

$$R_A = R_8 + R_P = 9400 + 1250 = 10,65 \text{ k}\Omega, \quad (25)$$

$$A_U = -\mu \cdot \frac{R_A}{R_A + r_A} = -17,5 \cdot \frac{10650}{10650 + 18700} = -6,35. \quad (26)$$

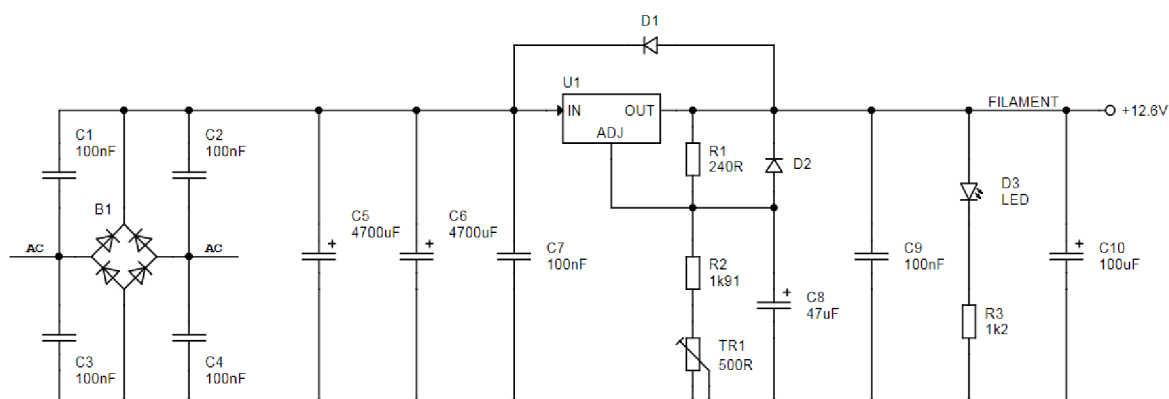
Parametr r_A představuje impedanci anody v daném pracovním bodě a R_A součet anodových odporů. I přes vliv parazitních kapacit vypočtená hodnota zesílení velmi přesně odpovídá naměřené, kdy A_U reálného obvodu koncového stupně vychází cca. -6,5.

3.3 Napájení

Tato kapitola se zabývá návrhem a konstrukcí napájecích zdrojů pro jednotlivé části zesilovače, tedy anodového zdroje o napětí 300 V a žhavicího zdroje 12,6 V.

3.3.1 Zdroj žhavení

Oba typy elektronek, které byly použity v tomto projektu (ECC82, ECC83) disponují možností žhavení napětím 6,3 V nebo 12,6 V (podle typu zapojení žhavicích vláken - sériově nebo paralelně). Zvoleno bylo napětí 12,6 V, protože potřebný žhavicí proud je poloviční a tím i výkonová a tepelná ztráta ve stabilizačním obvodu bude nižší.



Obr. 24 - Schéma zapojení zdroje žhavení

Schéma na Obr. 24 zobrazuje zapojení stabilizovaného zdroje s obvodem LM317T. Jedná se o doporučené zapojení výrobce [22], upravené pro výstupní napětí 12,6 V s vyšší mírou stability.

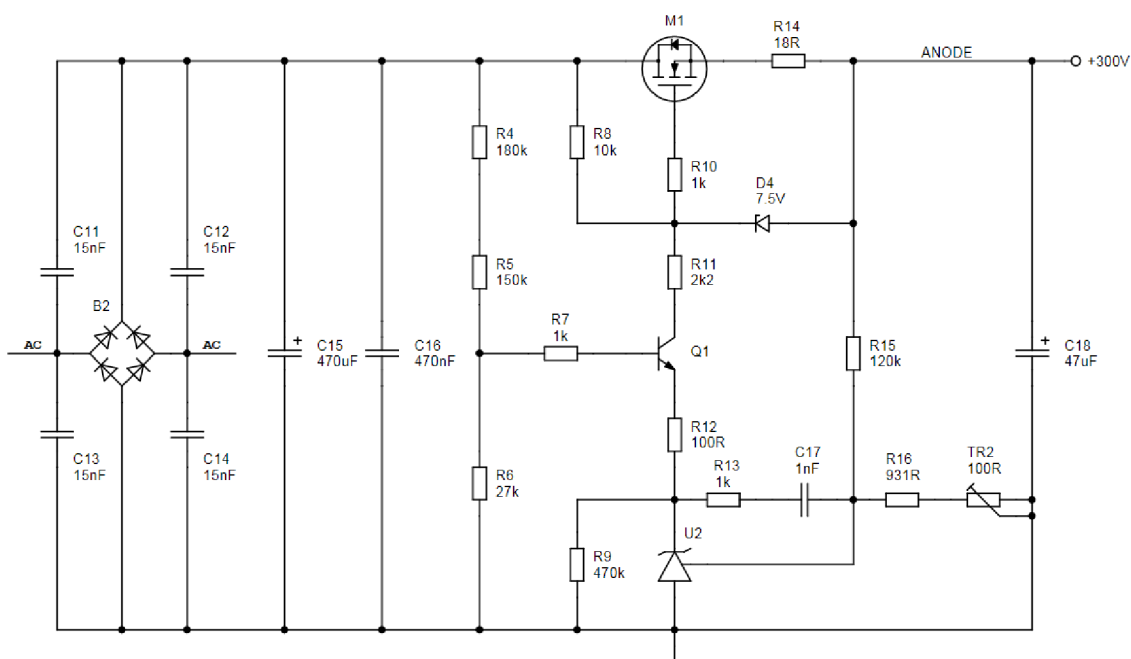
Střídavé napětí 15 V ze sekundární odbočky transformátoru je připojeno na svorky AC. To je dále usměrněno diodovým můstkem B1 a odfiltrováno pomocí kondenzátorů C1 - C6. Výstupní napětí obvodu se stanovuje podle [22]

$$U_{\text{FIL}} \cong U_{\text{REF}} \cdot \left(1 + \frac{R_2 + TR_1}{R_1}\right) = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{1910 + 270}{240}\right) = 12,6 \text{ V}. \quad (27)$$

Hodnota U_{REF} udává referenční napětí stabilizačního obvodu 1,25 V, rezistor R1 o velikosti 240 Ω byl zvolen na základě doporučení výrobce a hodnota větve, tvořící rezistor R2 a trimr TR1 je tedy 2180 Ω , přičemž výstupní napětí lze plynule regulovat a dostavovat tímto trimrem. Kondenzátory C7 až C10 slouží k celkové stabilizaci obvodu a zlepšují tak reakce stabilizátoru na připojenou zátěž. Diody D1 a D2 chrání integrovaný obvod před zkraty a přepólováním na výstupu. Dioda LED D3 signalizuje, zdali je napájecí větev aktivní a současně malým zatížením uvádí stabilizátor do pracovního režimu. Na výstupní svorky napájecího zdroje jsou už pouze připojeny jednotlivé elektrody žhavení elektronek.

3.3.2 Anodový zdroj

Většina dnešních elektronkových zesilovačů je napájena pouze usměrněným a LC, popř. RC členem filtrovaným napětím, čímž však není řešen možný pohyb pracovního bodu elektronek způsobený výkyvy a špičkami v rozvodné síti, což má negativní vliv na vlastnosti takového zařízení. Proto byl navržen zdroj stabilního anodového napětí pro tento zesilovač, viz schéma na Obr. 25.



Obr. 25 - Schéma zapojení anodového zdroje

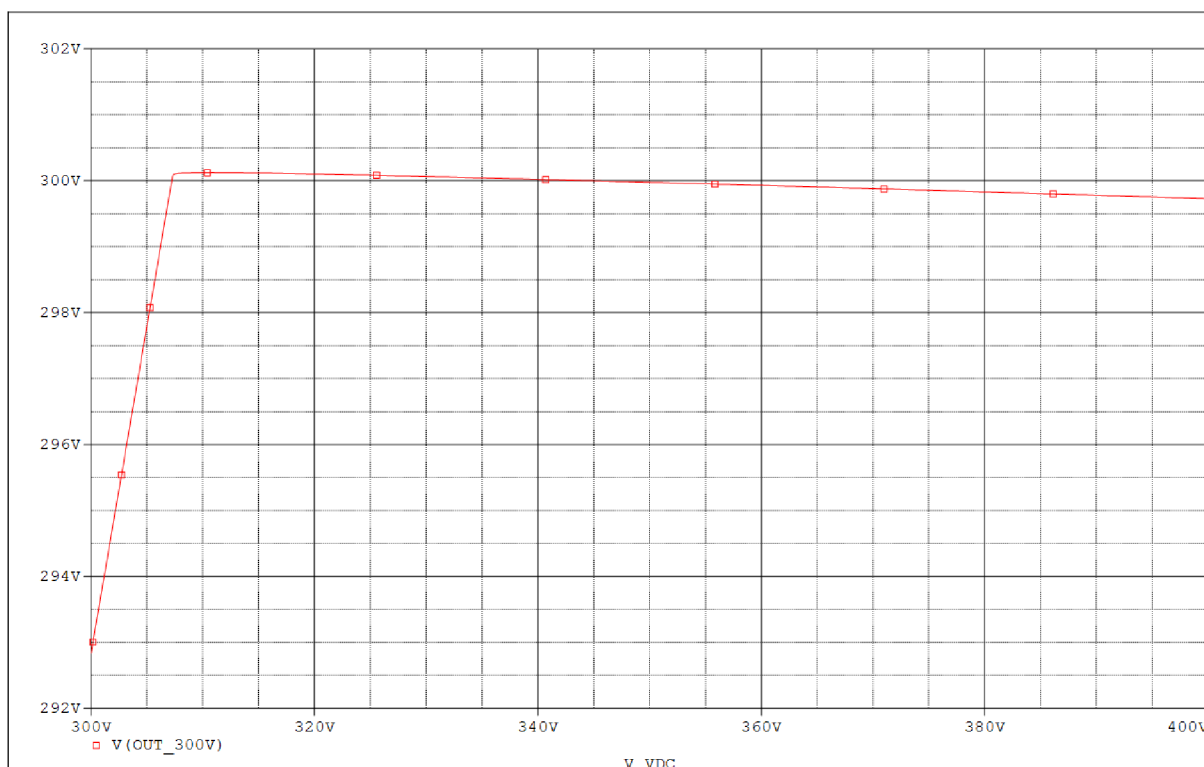
Základ obvodu tvoří výkonový tranzistor MOSFET a dva vstupní uzly, pomocí kterých je stabilizátor řízen.

Vstupní proměnnou tvoří napěťový dělič z rezistorů R4 - R6. Při změně vstupního napětí se mění proud do báze tranzistoru Q1, čímž je regulován protékající proud kolektorem a tedy i napětí na gate výkonového MOSFETu. Výstupní napětí je dáno poměrem stabilního referenčního napětí 2,5 V z reference U2 a rezistorovým děličem skládajícího se z R15, R16 a TR2. Za předpokladu, že hodnota odporu R16 a TR2 v sérii je 1 kΩ a je na nich udržováno napětí 2,5 V, protéká jimi proud 2,5 mA. Pokud je tedy na výstupu požadováno napětí 300 V, stačí tento obvod rozšířit o rezistor R15 s hodnotou

$$R_{15} = (TR_2 + R_{16}) \cdot \left(\frac{U_{OUT}}{U_{REF}} - 1 \right) = 1000 \cdot \left(\frac{300}{2,5} - 1 \right) = 119 \text{ k}\Omega. \quad (28)$$

Je tedy volena nejbližší hodnota z řady E12 120 kΩ. Proto je do obvodu zařazen trimr TR2, díky němuž lze plynule dostavovat velikost výstupního napětí na požadovaných 300 V.

Kondenzátory C16, C18 a filtr tvořený z R13 a C17 zamezují rozkmitání obvodu, taktéž rezistory R10 až R12 snižují zisk celé smyčky a zabraňují tak nestabilitám vlivem rušení. Pro účinné blokování těchto nežádoucích jevů je vhodné při tvorbě topologie plošného spoje umístit blokovací kapacity co nejbližší tranzistorům a taktéž omezit délku jednotlivých cest.



Obr. 26 - Simulace závislosti výstupního napětí stabilizátoru na vstupním

Na Obr. 26 je výstup ze simulace závislosti výstupního napětí na vstupním. Stabilizátor dodává na výstup požadovaných 300 V již při vstupním napětí 307 V a to se nadále mění v celém rozsahu pouze o 400 mV při maximální předpokládané zátěži 3 kΩ.

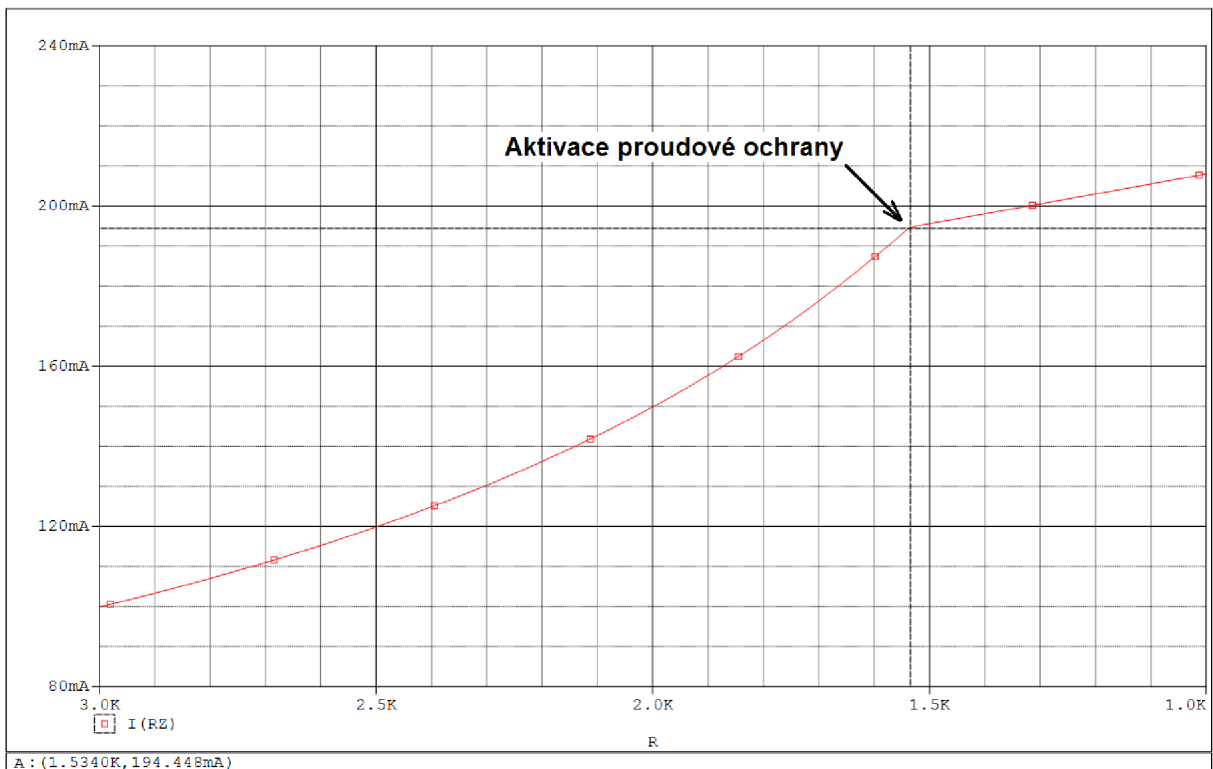
Na závěr je tento obvod doplněn o proudovou ochranu tvořenou rezistorem R14 a stabilizační diodou D4. Napětí U_{GS} , kdy už je tranzistor M1 dostatečně otevřen, se pohybuje okolo 5 V. Proud, tekoucí do zátěže, vytváří na rezistoru R14 úbytek napětí a pokud překročí hodnotu

$$I_{MAX} = \frac{U_Z - U_{THM1}}{R_{14}} = \frac{7,5 - 4}{18} \doteq 194,4 \text{ mA}, \quad (29)$$

stabilizační dioda o napětí 7,5 V, která je zapojena v závěrném směru mezi gate a source tranzistoru, zamezí dalšímu nárůstu napětí U_{GS} a tím i omezí proud drainem. Z toho plyne, že minimální odpor zátěže, kdy ještě není proudová ochrana aktivní, je

$$R_{MIN} = \frac{U_{OUT}}{I_{MAX}} = \frac{300}{0,1944} = 1543 \Omega. \quad (30)$$

Toto opatření chrání jak samotnou zátěž, tak i stabilizační obvod před výkonovým přetížením, hlavně z důvodu výkonové ztráty na tranzistoru M1, která může při maximální hodnotě vstupního napětí 400 V činit až 18 W. Taktéž je i chráněn napájecí transformátor, jehož sekundární výstup 230 V může do obvodu dodat proud až 0,24 A a tím by nemělo docházet k jeho nadměrnému zatěžování.



Obr. 27 - Simulace chování proudové ochrany

4 Měření

V této kapitole budou shrnuty parametry navrženého a sestrojeného sluchátkového zesilovače. Mezi měřená data patří velikosti napájecích napětí, pracovní body elektronek a dále také zesílení, šířka pásma zesilovače, odstup signálu od šumu SNR (angl. Signal to Noise Ratio) a přeslech mezi kanály (angl. Crosstalk).

Pro měření byly použity následující přístroje

- osciloskop Agilent DSO1012A (2 kanály, 100 MHz, 2 GSa/s),
- funkční generátor Agilent 33521A (1 kanál, 30 MHz, 250 MSa/s),
- multimetr Agilent 34401A.

Před měřením byl zesilovač zapnut na 30 minut pro ustálení jeho parametrů. Během této doby se napájecí anodové napětí ustálilo na hodnotě U_{DC} 299,96 V a žhavicí napětí U_{FIL} na 12,617 V.

4.1 Měření pracovního bodu

Pracovní bod elektronky se skládá z trojice parametrů - anodového napětí U_A , anodového proudu I_A a mřížkového předpětí U_G . Měření bylo prováděno u obou elektronek a u každého kanálu zvlášť.

Tabulka 6 - Naměřené hodnoty pracovního bodu elektronek

	Předzesilovač (ECC83)		Koncový stupeň (ECC82)	
	Levý kanál	Pravý kanál	Levý kanál	Pravý kanál
Anodové napětí U_A [V]	206,35	208,71	202,95	199,35
Anodový proud I_A [mA]	2,352	2,351	9,312	9,225
Předpětí mřížky U_G [V]	1,004	0,978	5,176	5,373

4.2 Měření zesílení a šířky pásma

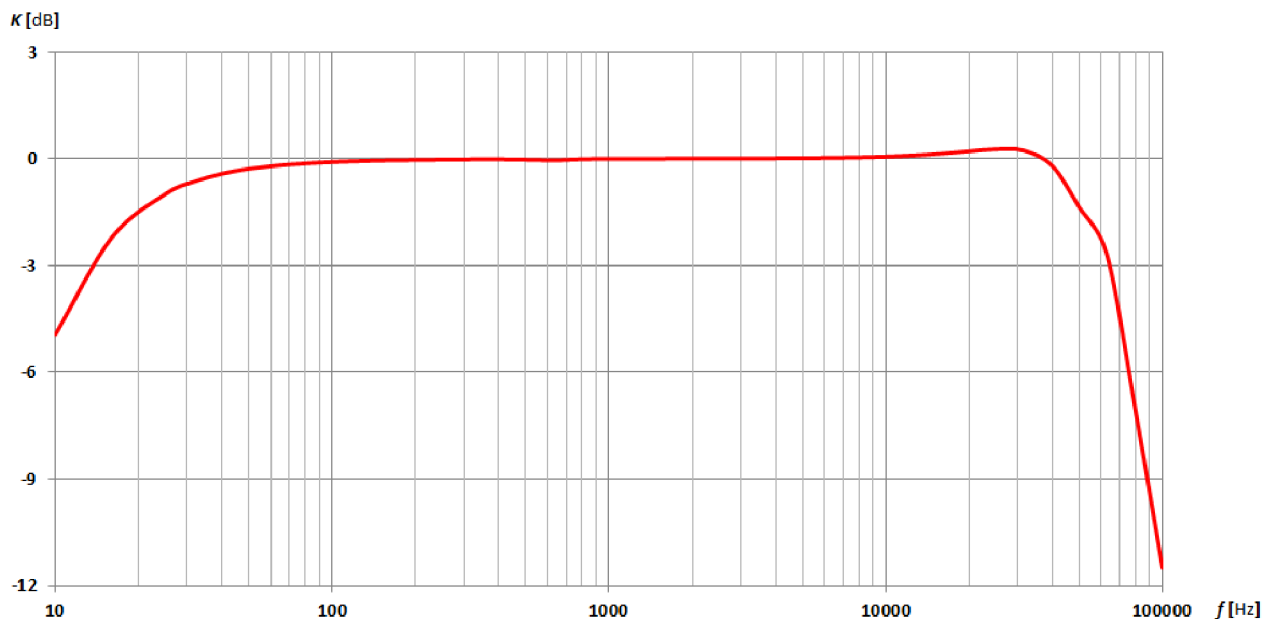
Pro toto měření byl zesilovač na výstupu zatížen odporovou zátěží o hodnotě 300 Ω , na vstup byl přiveden sinusový signál z funkčního generátoru o amplitudě 120 mV, z čehož vyplývá, že

$$A_U = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{3,3836}{0,12} = 28,2, \quad (31)$$

$$A = 20 \cdot \log(A_U) = 20 \cdot \log(28,2) = 29 \text{ dB}. \quad (32)$$

Při měření šířky pásma byla rozmitána frekvence vstupního signálu a odečítána amplituda na výstupu. Vztahem naměřených dat k referenční hodnotě 1 kHz lze obdržet závislost na Obr. 28.

Z naměřených dat vyplývá, že šířka pásma zesilovače je 16 Hz - 63 kHz (-3 dB).



Obr. 28 - Šířka pásma zesilovače

4.3 Měření parametru odstup signál-šum a přeslechů

Odstup signálu od šumu lze měřit, jsou-li všechny vstupní signálové svorky zkratovány na zem. Výsledný signál, který je měřen na výstupu zesilovače udává velikost nežádoucího šumu podle

$$SNR = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{OUTMAX}}{U_{NOISE}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{3,3836}{2,26 \cdot 10^{-3}}\right) = 63,5 \text{ dB} . \quad (33)$$

Napětí U_{NOISE} udává maximální amplitudu šumu naměřenou na výstupu a U_{OUTMAX} je maximální velikost výstupního užitečného signálu do definované zátěže (300Ω).

Přeslech mezi kanály se měří připojením generátoru na některý z dvojice vstupů, přičemž druhý je zkratován na zem. Amplituda budícího signálu by měla být taková, aby výstupní zesílený signál byl 1 dB před limitací. Poté je na výstupu odečítána dvojice hodnot napětí, kde se přeslech vypočítá jako

$$Crosstalk = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{OUTMAX}}{U_{OUTMIN}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{3,3836}{10,24 \cdot 10^{-3}}\right) = 50,4 \text{ dB} , \quad (34)$$

U_{OUTMAX} značí napětí na aktivním výstupu a U_{OUTMIN} představuje napětí uzemněného kanálu.

Závěr

V úvodu této bakalářské práce jsem provedl rozbor elektronkových součástek, popis elektrických vlastností a také různé varianty návrhu zesilovače s jejich použitím. Na závěr této části jsem také stanovil základní body budoucího návrhu, tedy dvoukanálový dvoustupňový elektronkový zesilovač pracující v třídě A, kde výstupní člen budou tvořit převodní audio transformátory.

Zařízení jsem od počátku navrhoval pro použití s konkrétním modelem sluchátek Sennheiser HD 650, jejichž reprodukční pásmo je 10 - 39500 Hz (-10 dB), nominální impedance 300 Ω a akustický tlak 103 dB při 1 V_{RMS}. Napěťový zisk zesilovače je 29 dB a tedy při maximální vstupní citlivosti 120 mV jsou sluchátka schopny reprodukovat zvuk o hlasitosti až 114 dB. Frekvenční pásmo zesilovače se pohybuje v rozmezí 16 Hz až 63 kHz při poklesu 3 dB, popř. 8 Hz až 80 kHz při poklesu 10 dB, čímž předčí i reprodukční schopnosti měničů.

Pracovní bod všech elektronek se pohyboval okolo původně navrhovaných hodnot, pouze elektronka ECC83, tvořící předzesilující stupeň měla o málo vyšší anodové napětí (206 V a 208 V namísto 200 V), čímž se naopak pracovní bod ještě dále posunul do lineární části převodní charakteristiky. Všechny tyto skutečnosti byly způsobeny tolerancí parametrů elektronek a změnou odporu rezistorů vlivem teplotního součinitele.

Dále jsem provedl měření odstupů signálu od šumu SNR, kdy pro celkem 2000 naměřených vzorků šumu vycházela nejvyšší amplituda 2,26 mV, což při maximálním výstupním napětí 3,3836 V znamená poměr 63,5 dB. Přeslech mezi oběma kanály vycházel hůře, 50,4 dB. Naměřené hodnoty SNR a Crosstalk jsou v porovnání s parametry dnešních zesilovačů nízké, v rámci elektronkové technologie se však jedná o obvyklé hodnoty. Protiváhou těmto výsledkům je však excelentní přenosové pásmo, které má stabilní průběh a začíná klesat až při velmi nízkých/vysokých kmitočtech. Budoucím vylepšením by mohlo být umístění zesilovače do celokovové přístrojové krabice, která by odstínila rušení zvenčí, což by mělo pozitivní vliv na parametr SNR a dále realizace obvodu samotného zesilovače na plošném spoji namísto metody point-to-point.

Na tomto projektu si velice cením nabytých zkušeností, ať už je to práce s elektronkami, s jejichž využitím jsem se zabýval poprvé, anebo návrhem vysokonapěťového stabilizátoru na 300 V, což byla i celkově nejobtížnější část této práce (finálnímu obvodu předcházely dvě odlišné verze, u nichž byly problémy se stabilitou). V neposlední řadě si taktéž cením zkušeností získaných při komplexním návrhu s využitím výstupních audio transformátorů švédské firmy Lundahl, díky jejichž produktové nabídce se tato práce podařila realizovat.

Seznam použité literatury

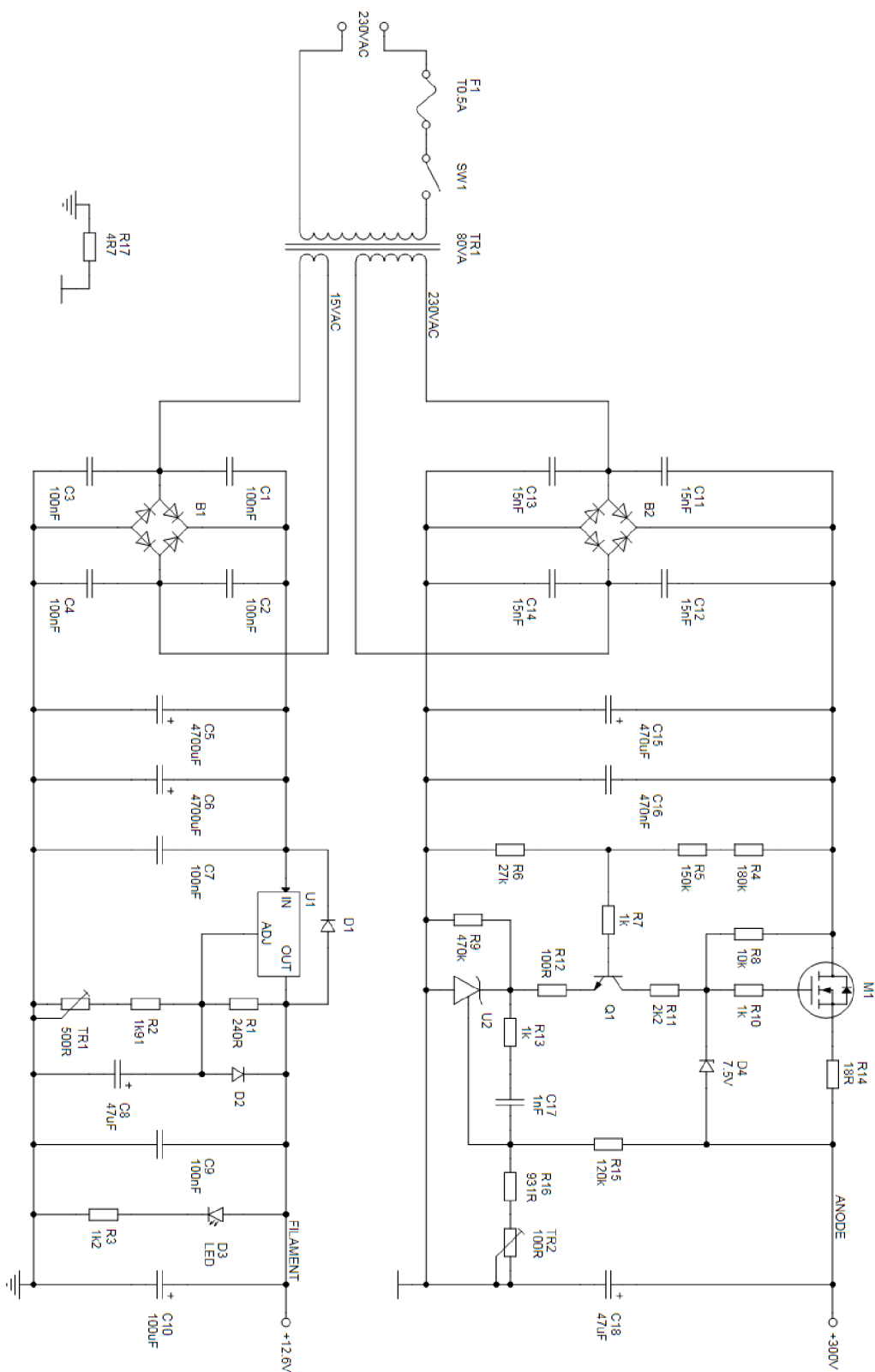
- [1] VLACH, Jaroslav. Lampárna aneb Co to zkusit s elektronkami ? [online]. Praha: BEN - technická literatura, 2004 [cit. 2014-12-01]. ISBN 978-80-7300-387-6. Dostupné z: <http://shop.ben.cz/cz/121131-lamparna.aspx>
- [2] Lee de Forest. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Lee_de_Forest
- [3] History of the transistor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_transistor
- [4] RecordingHacks: Neumann U47. RECORDINGHACKS. Neumann U47 Multi-Pattern Tube Condenser Microphone [online]. 2013 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://recordinghacks.com/microphones/Neumann/U-47>
- [5] QUIMBY, John. The Neumann Model U47: multi-directional condenser microphone. The Neumann Model U47 [online]. [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.coutant.org/u47/>
- [6] Definition: Richardson-Dushman Equation. SCIENTIFIC INSTRUMENT SERVICES, Inc. (SIS). SIMION [online]. 2003 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: http://simion.com/definition/richardson_dushman.html
- [7] AMPEREX. Amperex tube type 5AR4/GZ34: High vacuum, full-wave rectifier [online]. 1958, 9/58 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://frank.pocnet.net/sheets/035/5/5AR4.pdf>
- [8] General Electric 12AX7: Twin Triode [online]. 1951. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.mif.pg.gda.pl/homepages/frank/sheets/093/1/12AX7.pdf>
- [9] BOUŠEK, J. UMEL FEKT VUT V BRNĚ. Elektronické součástky: ESO / P12. 2005, 30 s. [cit. 2014-12-01] Dostupné z: <http://www.umel.fec.vutbr.cz/~bousek/eso/tabL12.pdf>
- [10] ELEKTRONKY - VI - TRIODA. [online]. 2003, č. 6, s. 1, 26. 04. 2003 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.zesilovace.cz/view.php?cisloclanku=2003042602>
- [11] ELEKTRONKY VIII - PENTODA. [online]. 2004, č. 8, s. 1, 06. 12. 2004 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.zesilovace.cz/view.php?cisloclanku=2004120601>
- [12] JJ ELECTRONICS. EL84: R.F. Output pentode [online]. 2003 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.jj-electronic.com/pdf/EL84.pdf>
- [13] Designing Common-Cathode Triode Amplifiers. Aiken Amplification [online]. 2014, 02-18-2014 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.aikenamps.com/index.php/designing-common-cathode-triode-amplifiers>

- [14] Cathode Follower Output Impedance Calculator. Amp Books LLC [online]. [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.ampbooks.com/home/amplifier-calculators/cathode-follower/>
- [15] SENNHEISER ELECTRONIC GMBH & CO. KG. Sennheiser HD 650 [online]. 2010 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: [http://app.sennheiser.com/sennheiser/products.nsf/resources/HD650.pdf/\\$File/HD650.pdf](http://app.sennheiser.com/sennheiser/products.nsf/resources/HD650.pdf/$File/HD650.pdf)
- [16] Decibels. PB ASSOCIATES. Sound On Sound [online]. 1994 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: http://www.soundonsound.com/sos/1994_articles/feb94/decibels.html
- [17] Philips ECC81: R.F. Double Triode [online]. 1969. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.drtube.com/datasheets/ecc81-philips1969.pdf>
- [18] General Electric 12AU7: Twin Triode [online]. 1956. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.mif.pg.gda.pl/homepages/frank/sheets/093/1/12AU7A.pdf>
- [19] Philips ECC88: Double Triode [online]. 1958. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.goldenmiddle.com/files/ECC88.pdf>
- [20] Designing Common-Cathode Triode Amplifiers [online]. 2000. AIKEN, Randall. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.aikenamps.com/index.php/designing-common-cathode-triode-amplifiers>
- [21] Tube Amplifier Interstage Transformer / Line Output Transformer: LL1660 [online]. 2003. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.lundahl.se/pdf/1660.pdf>
- [22] Texas Instruments. 2004. Three-Terminal Adjustable Regulator: LM117/LM317A/LM317-N [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm117.pdf>

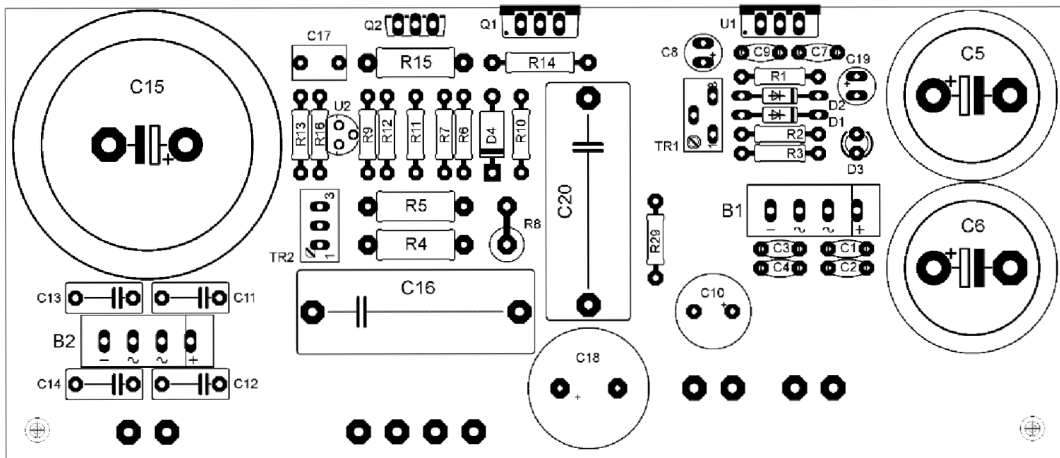
Seznam zkratek a symbolů

a	anoda elektronky
A	Richardsonova konstanta
A_U	napěťové zesílení [-]
C_a	parazitní kapacita anody [pF]
$C_{g/a}$	parazitní kapacita mřížka - anoda [pF]
$C_{g/k}$	parazitní kapacita mřížka - katoda [pF]
CRT	cathode-ray tube
C_{V1}	vstupní vazební kondenzátor
C_{V2}	výstupní vazební kondenzátor
D	průnik [-]
DPS	deska plošného spoje
f	filament (žhavení)
f, k	společná elektroda katody a žhavení
f_M	mezní kmitočet [Hz]
g, g_1	grid 1, řídicí mřížka
g_2	grid 2, stínící mřížka
g_3	grid 3, hradící mřížka
h	Planckova konstanta
I_a	anodový proud [mA]
I_f	žhavíci proud [mA]
I_{g2}	proud stínící mřížkou [mA]
j_s	Hustota emisního proudu
k	Boltzmanova konstanta, katoda elektronky
LCD	liquid crystal display
LED	Light emitting diode
m	hmotnost elektronu
q	náboj elektronu
R_A	anodový rezistor
R_G	mřížkový rezistor
R_i	vnitřní odpor [Ω]
R_{IN}	vstupní odpor [Ω]
R_K	katodový rezistor
S	strmost [mA/V]
SNR	Signal to Noise Ratio [dB]
T	absolutní teplota [K]
THD	Total Harmonic Distortion
U_a	anodové napětí [V]
U_f	žhavíci napětí [V]
U_g	mřížkové napětí [V]
W	výstupní práce elektronu z kovu [J]
W_A	anodová ztráta [W]
μ	zesilovací číselník [-]

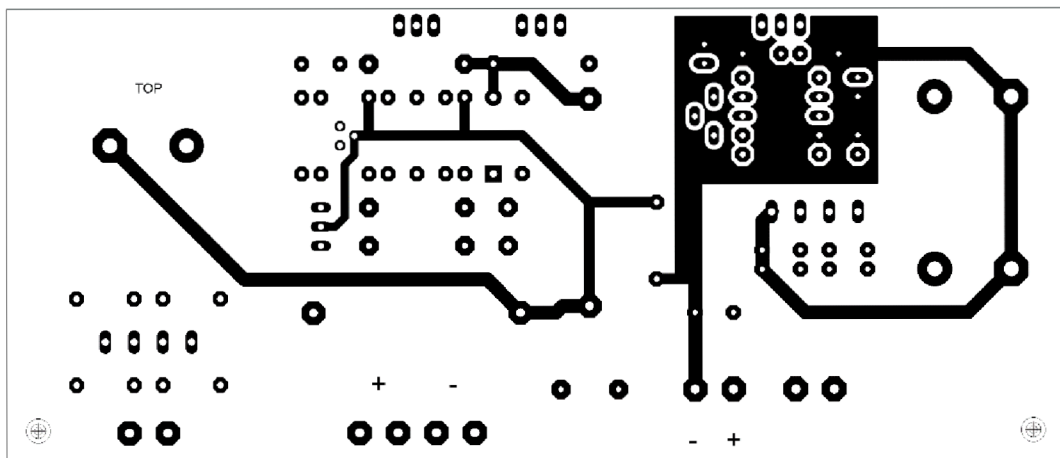
Přílohy



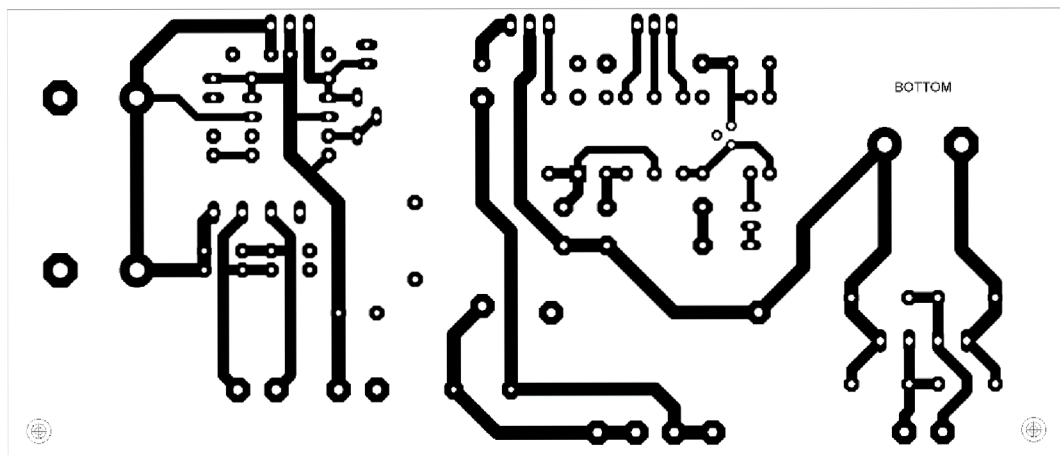
Obr. 29 - Schéma zapojení napájecích zdrojů



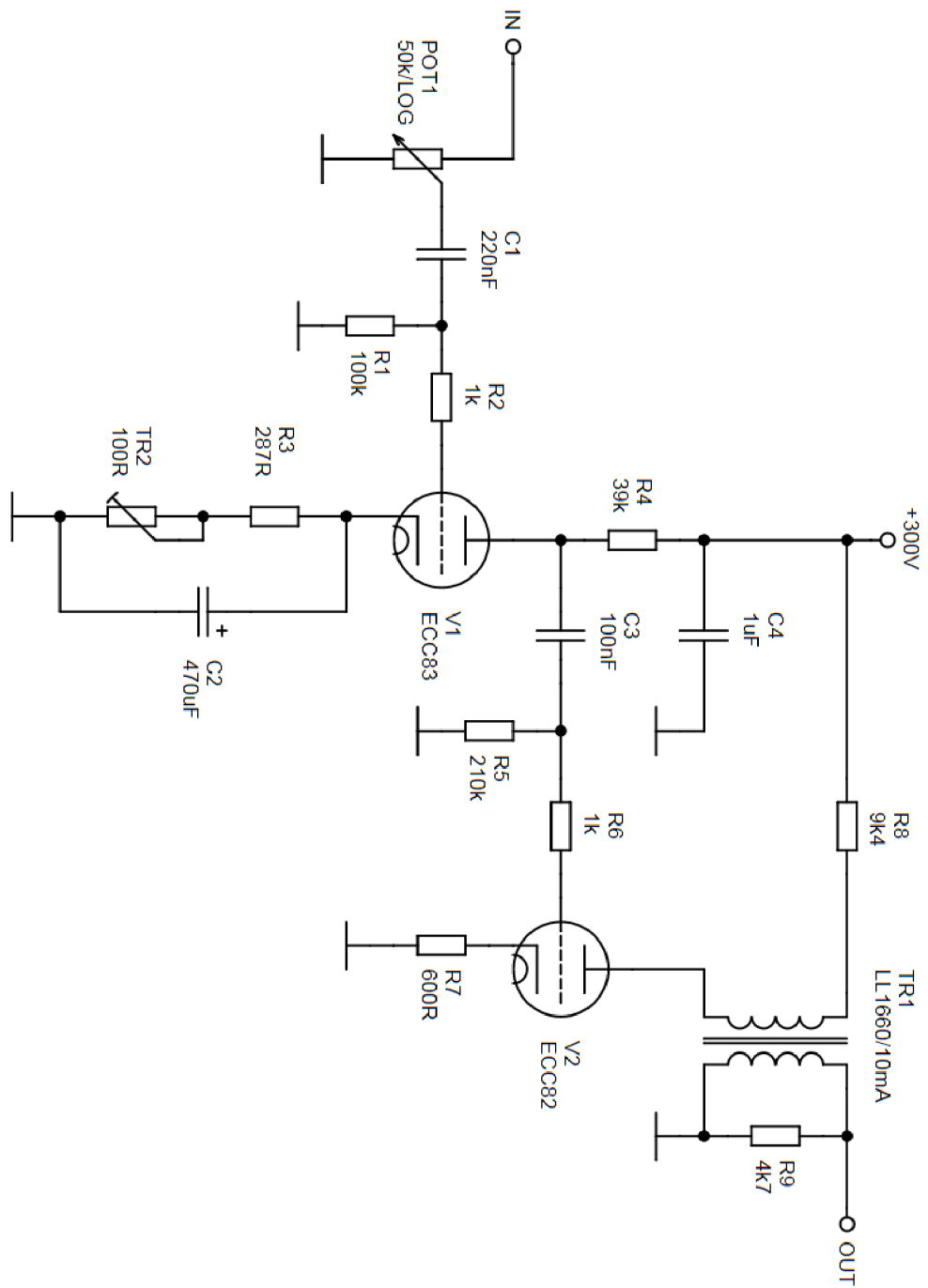
Obr. 30 - Rozmístění součástek na DPS zdroje



Obr. 31 - TOP vrstva DPS



Obr. 32 - BOTTOM vrstva DPS



Obr. 33 - Schéma zapojení zesilovače (1 kanál)

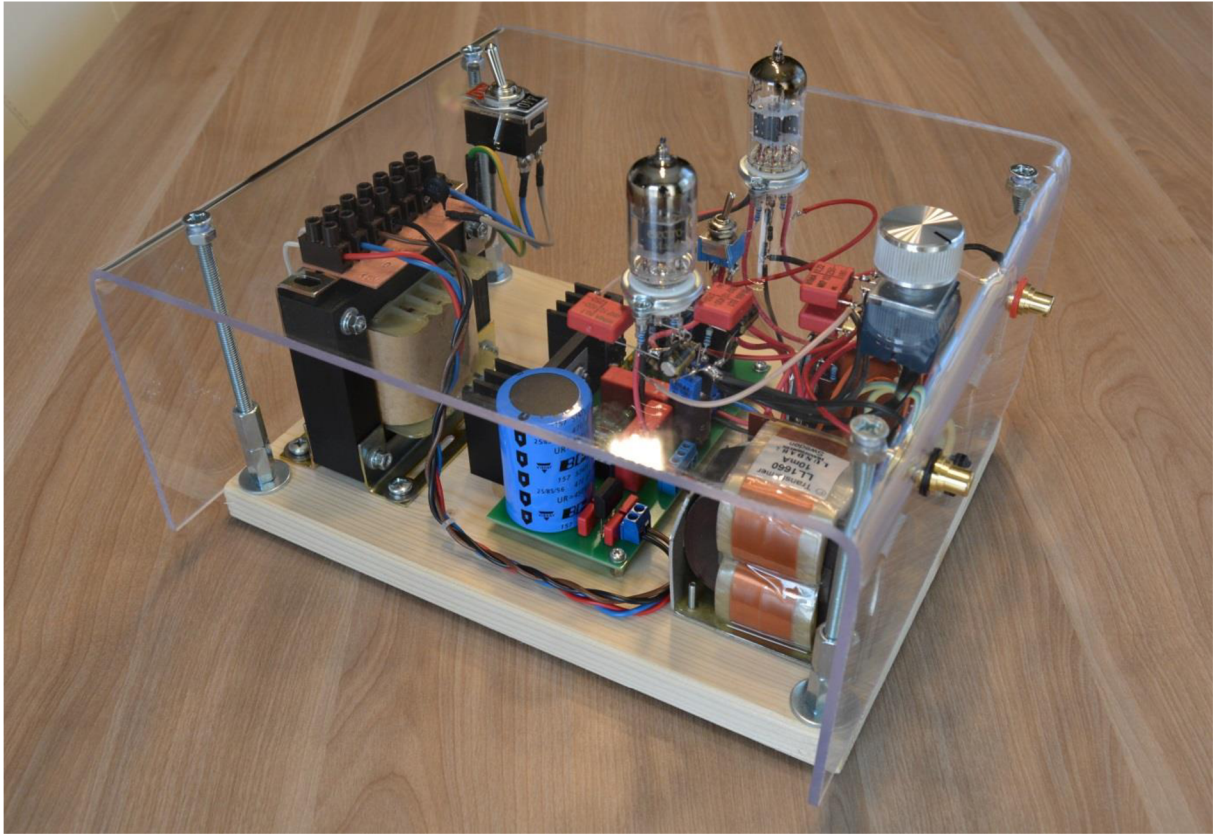
Tabulka 7 - Rozpiska součástek

Stabilizátory	
R1	240R
R2	1k91
R3	1k2
R4	180k/2W
R5	150k/2W
R6	27k
R7, R10, R13	1k
R8	10k/2W
R9	470k
R11	2k2
R12	100R
R14	18R/1W
R15	120k/2W
R16	931R
R17	4R7
TR1	100R
TR2	500R
C1 - C4, C7, C9	ker. 100nF/50V
C5, C6	4700uF/35V
C8	47uF/35V
C10	100uF/35V
C11-C14	foil. 15nF/630V
C15	470uF/450V
C16	foil. 470nF/630V
C17	foil. 1nF/100V
C18	47uF/400V
M1	IRFBG30
Q1	MJE13003
U1	LM317T
U2	TL431
D1, D2	1N4007
D3	LED, RED
D4	Zener 7,5V/1,3W
B1	KBP04
B2	KBP10
TR1	230V/230V, 15V, 80VA

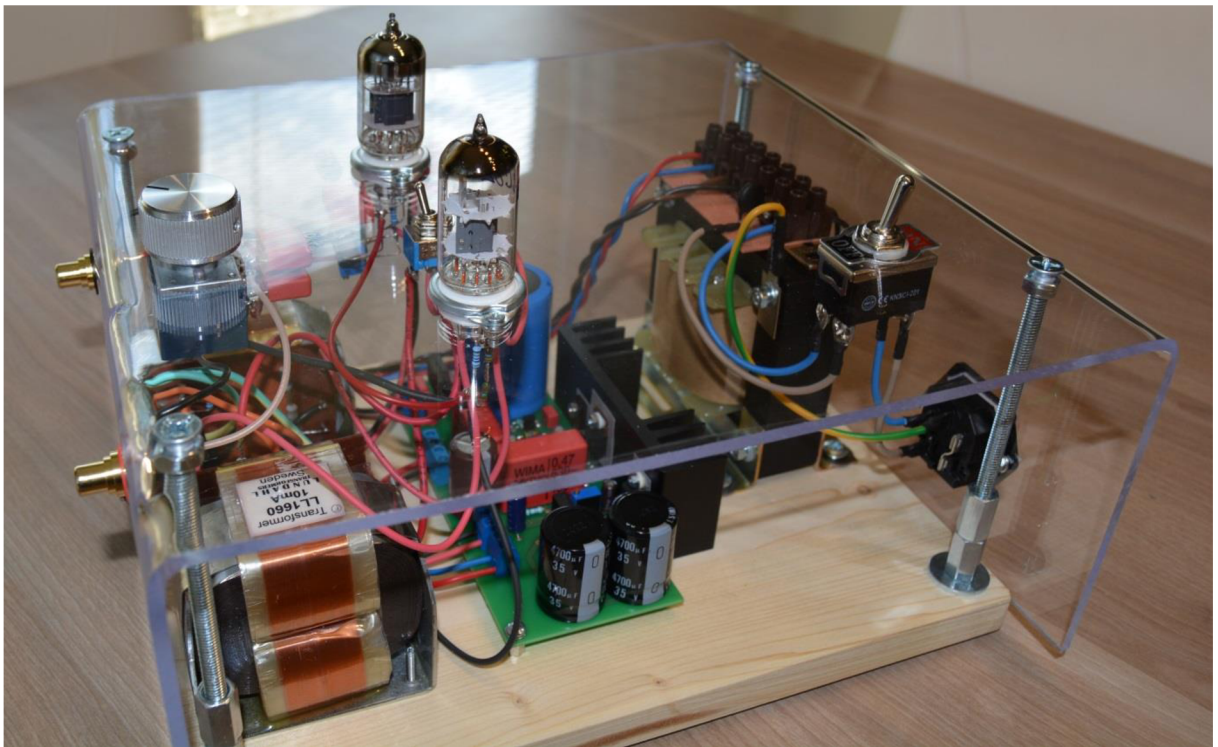
Zesilovač (1 kanál)	
R1	100k
R2, R6	1k
R3	287R
R4	39k/1W
R5	210k
R7	600R
R8	9k4/2W
R9	4k7
POT1	50k/LOG, stereo
C1	foil. 220nF/250V
C2	470uF/10V
C3	foil. 100nF/400V
C4	foil. 1uF/400V
TR1	Lundahl LL1660/10mA
V1	ECC83
V2	ECC82

Tabulka 8 - Naměřené hodnoty pro stanovení šířky pásma zesilovače

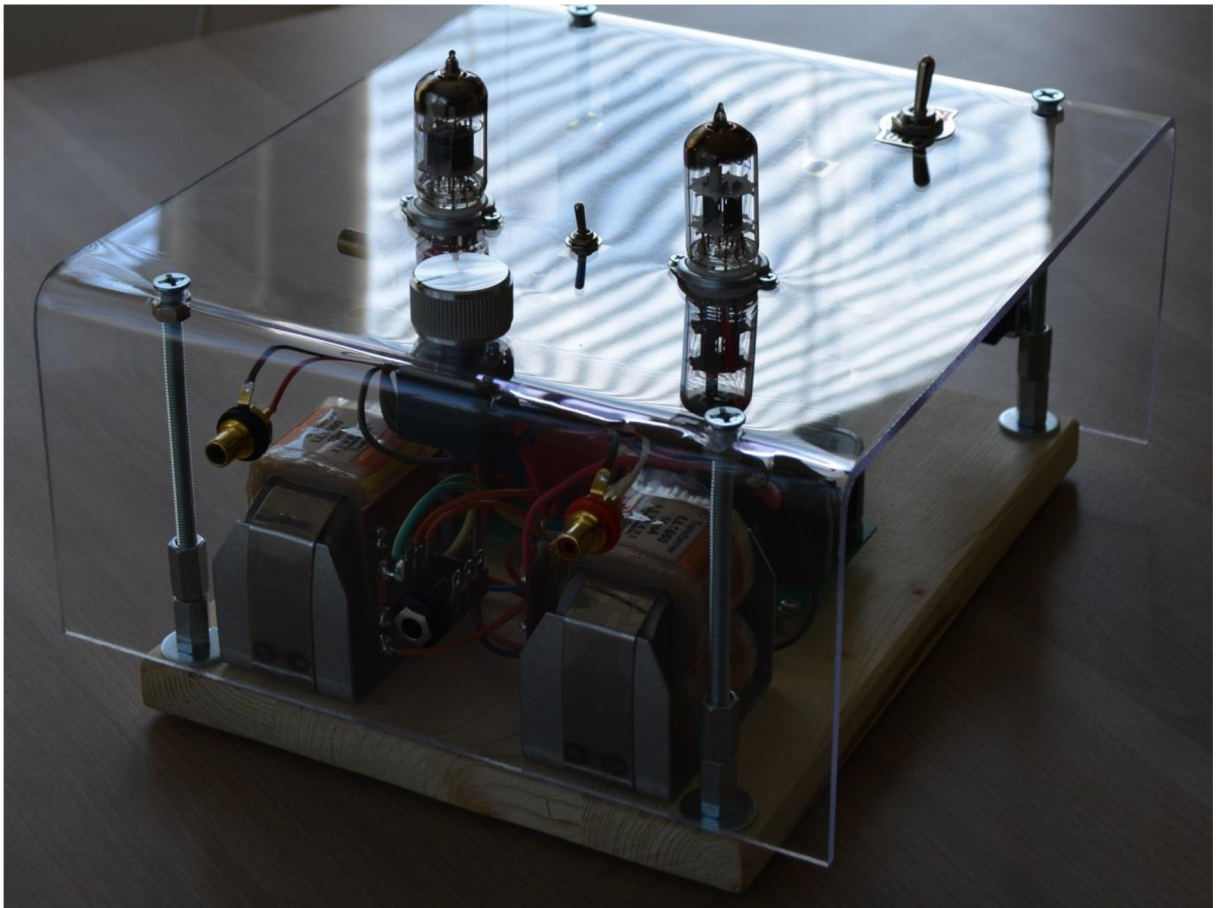
Levý kanál		Pravý kanál	
f [Hz]	U_{OUT} [V]	f [Hz]	U_{OUT} [V]
10	1,822	10	1,812
16	2,449	16	2,480
25	2,797	25	2,854
32	2,902	32	2,968
40	2,975	40	3,047
50	3,021	50	3,096
63	3,051	63	3,129
80	3,072	80	3,151
100	3,085	100	3,165
125	3,094	125	3,175
160	3,101	160	3,182
200	3,105	200	3,186
250	3,108	250	3,189
315	3,111	315	3,192
400	3,112	400	3,193
630	3,104	630	3,184
800	3,114	800	3,194
1000	3,117	1000	3,197
1250	3,119	1250	3,198
1600	3,120	1600	3,199
2000	3,120	2000	3,199
2500	3,121	2500	3,200
3150	3,121	3150	3,201
4000	3,122	4000	3,202
5000	3,123	5000	3,204
6300	3,125	6300	3,207
8000	3,129	8000	3,212
10000	3,136	10000	3,220
12500	3,147	12500	3,232
16000	3,164	16000	3,253
20000	3,184	20000	3,277
25000	3,200	25000	3,300
31500	3,180	31500	3,286
40000	3,021	40000	3,125
50000	2,658	50000	2,735
63000	2,245	63000	2,348
80000	1,355	80000	1,414
100000	0,8190	100000	0,8518



Obr. 34 - Hotový výrobek (1)



Obr. 35 - Hotový výrobek (2)



Obr. 36 - Hotový výrobek (3)