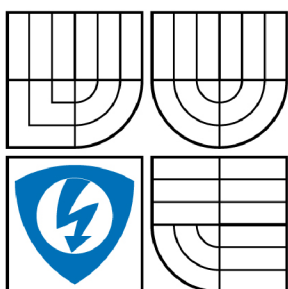


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH KOREKČNÍHO PŘEDZESILOVAČE PRO KLASICKÝ GRAMOFON

DESIGN OF CORRECTION PREAMPLIFIER FOR CONVENTIONAL RECORD-PLAYER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

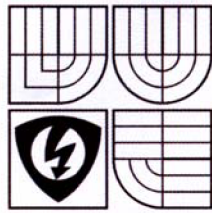
MIROSLAV KOŠARIŠŤAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LUBOMÍR BRANČÍK, CSc.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Košarištan Miroslav
Ročník: 3

ID: 78174
Akademický rok: 2008/09

NÁZEV TÉMATU:

Návrh korekčního předzesilovače pro klasický gramofon

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte rekapitulaci požadavků kladených na korekční předzesilovače pro použití v klasických gramofonech. Srovnajte dvě základní koncepce jejich řešení: zapojení na polovodičové bázi, s použitím integrovaných obvodů, a zapojení na bázi moderních elektronek. Vlastnosti zapojení či jejich vybraných částí simulujte v programu PSpice.

Navrhněte zapojení korekčního předzesilovače pro klasický gramofon na bázi součástkové základny moderních elektronek. Navrhněte a realizujte desku plošných spojů pomocí programu Eagle. Předzesilovač realizujte a proveďte měření jeho základních parametrů. Výsledky měření porovnejte s výsledky simulací v programu PSpice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:


- [1] KOTISA, Z. NF zesilovače 1. - předzesilovače. Praha: BEN - technická literatura, 2002.
- [2] VLACH, J., VLACHOVÁ, V. Lampárna - aneb Co to zkusit s elektronkami? Praha: BEN - technická literatura, 2004.
- [3] Tube CAD Journal: John Broskie's Guide to Tube Circuit Analysis & Design. GlassWare 1999 - 2008. Dostupné na [www: http://www.tubecad.com/](http://www.tubecad.com/).

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:


prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt:

Cílem této práce je navrhnout korekční předzesilovač pro klasický gramofon, ukázat přednosti elektronek pro tyto typy zapojení. V první části je naznačena činnost elektronky, její dělení a značení, dále se práce věnuje teorii přenosky a záznamové charakteristice, korekčním předzesilovačem, jeho korekcemi a návrhem zapojení s elektronkami.

Další část práce obsahuje srovnání zapojení na bázi elektronek a polovodičové bázi, kde je kladen hlavní důraz na kvalitu elektronkového zvuku.

Důležitou částí je realizace korekčního předzesilovače. Cílem je vytvořit desku plošných spojů v programu Eagle. Součástí realizace je zdroj anodového napětí a zdroj žhavení. V závěru práce jsou uvedeny naměřené hodnoty, ukázka moderních gramofonů a napájecích zdrojů.

Klíčová slova:

Elektronky, magnetodynamická přenoska, záznamová a RIAA charakteristika, pasivní a aktivní korekce, operační zesilovače řady LME, tranzistorový jev, zkreslení SID a TIM, program Eagle, program PSpice.

Abstract:

The aim of the work is to suggest the correction preamplifier for conventional record – player, show preferences for these types of wirings. Schematic action vacuum tube, its division and marking are in the first part of the work, further work attends to theory pick – up head and recording characteristics, correction preamplifier, its corrections and design wiring with vacuum tubes.

Next part of the work includes comparing wiring on base vacuum tubes and semiconductor base, where main emphasis on quality vacuum tubes sound is placed.

Realization of correction preamplifier and creation of the printed circuit board in Eagle program is important part of the work. Part of realization is source anode voltage and filament power supply. Measured values, show modern record – players and power supply are mentioned in the end of the work.

Keywords:

Vacuum tubes, magnetodynamic pick-up head, recording and RIAA characteristic, passive and active corrections, operational amplifiers series LME, transistor effect, SID and TIM distortions, program Eagle, program PSpice.

KOŠARIŠŤAN, M. Návrh korekčního předzesilovače pro klasický gramofon. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 39 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh korekčního předzesilovače pro klasický gramofon 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 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Lubomírovi Brančíkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	2
2	Elektronky.....	3
2.1	Základy historie elektronky.....	3
2.2	Princip elektronky.....	3
2.3	Konstrukce elektronky.....	3
2.4	Značení a druhy elektronek.....	4
2.5	Příklad použití elektronky v základním zapojení zesilovače.....	6
3	Problematika předzesilovače pro přenosku.....	7
3.1	Přenoskové raménko.....	7
3.2	Přenosky.....	7
3.3	Hrot přenosky.....	8
3.4	Záznamová charakteristika.....	8
4	Korekční předzesilovač.....	11
4.1	Korekce - pasivní, aktivní.....	12
4.2	Zapojení korekčního předzesilovače s elektronkami.....	15
4.3	Porovnání charakteristiky RIAA.....	16
4.4	Zapojení s operačními zesilovači.....	17
5	Srovnání zapojení elektronka – operační zesilovač.....	18
5.1	Problematika zkreslení TIM a SID.....	18
5.2	Tranzistorový jev.....	19
5.3	Lampové zkreslovače.....	20
5.4	Tranzistorové limitace.....	21
5.5	Harmonické zkreslení.....	21
5.6	Intermodulační zkreslení TID.....	21
5.7	Gramofonový zvuk.....	21
6	Napájecí zdroje.....	23
7	Vytvoření desky plošného spoje v programu Eagle.....	24
7.1	Vytvoření korekčního předzesilovače.....	24
7.2	Vytvoření zdroje anodového napětí.....	25
7.3	Vytvoření zdroje žhavení.....	27
8	Výsledky měření, srovnání.....	29
9	Ukázky moderních gramofonů.....	31
10	Závěr.....	32
11	Seznam použité literatury a jiných zdrojů.....	33

Seznam obrázků

Obr.1. Elektronka – trioda; principální náčrt konstrukce triody	3
Obr. 2. Základní zapojení elektronky jako zesilovače.....	6
Obr. 3. Ramínka.....	7
Obr. 4. Přenosky.....	8
Obr. 5. Záznamová charakteristika, používaná pro záznam signálu (RIAA)); v je průběh záznamové rychlosti a A jsou odpovídající výchylky (amplituda).....	9
Obr. 6. Kmitočtová charakteristika RIAA.....	11
Obr. 7. Blokové schéma zesilovače s pasivními korekcemi.....	13
Obr. 8. Blokové schéma zesilovače s rozdělenými korekcemi.....	13
Obr. 9. Zesilovač s aktivními korekcemi.....	14
Obr. 10. Zapojení s výstupním bufferem.....	14
Obr. 11. Korekční předzesilovač s elektronkami.....	15
Obr. 12. Princip μ -sledovače (SRPP).....	16
Obr. 13. Výsledná charakteristika korekčního předzesilovače.....	16
Obr. 14. Simulace korekčního předzesilovače s elektronkami v programu PSpice.....	17
Obr. 15. Korekční předzesilovač s operačními zesilovači.....	17
Obr. 16. Zkreslení TIM a související SID.....	18
Obr. 17. Zdroj anodového napětí.....	23
Obr. 18. Zdroj žhavicího napětí.....	23
Obr. 19. Deska korekčního předzesilovače vytvořená v programu Eagle.....	24
Obr. 20. Foto osazeného korekčního předzesilovače pravého kanálu.....	25
Obr. 21. Foto osazeného korekčního předzesilovače levého kanálu.....	25
Obr. 22. Deska zdroje anodového napětí vytvořená v programu Eagle.....	26
Obr. 23. Foto osazeného zdroje anodového napětí.....	26
Obr. 24. Deska zdroje žhavení vytvořená v programu Eagle.....	27
Obr. 25. Foto osazeného zdroje žhavení.....	28
Obr. 26. Ukázka simulace zdroje žhavení v programu PSpice.....	28
Obr. 27. Naměřená kmitočtová charakteristika RIAA korekčního předzesilovače.....	29
Obr. 28. Simulace korekčního předzesilovače s elektronkami v programu PSpice.....	30
Obr. 29. Moderní gramofony.....	31

Seznam tabulek

Tab. 1. Názvosloví elektronek.....	4
Tab. 2. Příklady výrobců elektronek.....	5
Tab. 3. Hodnoty k Obr. 5.	9
Tab. 4. Časové konstanty pro různé výrobce desek.....	12
Tab. 5. Převod časová konstanta – kmitočet.....	12
Tab. 6. Naměřené hodnoty kmitočtové charakteristiky.....	29

1 Úvod

V dnešní době nastává renesance různých přístrojů, o kterých se v minulosti tvrdilo, že budou překonány a zapomenuty. Jeden z příkladů je klasický gramofon. Bylo by zajímavé zjistit, kolik světových výrobců tyto přístroje opět vyrábí. Příkladem za všechny je firma PROJECT (bývalá Tesla Litovel), která vyvází tyto gramofony prostřednictvím rakouské firmy do celého světa. Tyto přístroje jsou samozřejmě o dnešních technologiích a materiálech (uhlík, kevlar, akrylát) a také cena nejdražšího typu z celkové nabídky přibližně dvanáct modelů sahá ke sto tisíc korun. Vzhledem k tomu, že pokročila technologie vinylových desek a snímacích vložek (Ortofon, Sumiko), je nutné použít i kvalitní zesilovací řetězec.

Lampy, nebo technicky lépe elektronky, byly elektronickými prvky, které do značné míry změnilly postavení a význam elektrotechniky a elektroniky v průběhu první poloviny 20. století. Od padesátých let jejich význam postupně slábnul, prakticky na většinu pozic byly elektronky postupně nahrazovány novými prvky polovodičovými. Avšak stále se najdou fandové, milovníci starých nebo klasických řešení, sběratelé či muzikanti, kteří na elektronky nedají dopustit. Jestliže ve většině elektronických zařízení se nelze vrátit k překonaným řešením, tak zrovna v oblasti profesionálních i amatérských nízkofrekvenčních zesilovačů pro hudební nástroje (zejména kytary) se stále častěji objevují konstrukce výkonových nízkofrekvenčních zesilovačů osazených elektronkami. Tato zařízení nacházejí uplatnění především pro svůj charakteristický zvuk, který tranzistorový zesilovač nedokáže nahradit. Řada světových výrobců profesionálních nízkofrekvenčních zařízení nabízí takové zesilovače v cenových relacích, nad nimiž se mnohdy až tají dech.

V současné době se ve světě výrobou elektronek zabývá řada firem. V České republice se elektronky vyrábějí ve firmě TESLA Vršovice, s.r.o. (původní název Radioslava). Z nejbližšího okolí je největším výrobcem elektronek slovenská firma JJ electronic v Čadci, která navázala na dobré tradice výroby elektronek v Československu.

V této práci jsem vytvořil v programu Eagle desku plošného spoje pro korekční zesilovač. Elektronky nejsou součástí knihoven programu, musely se zvlášť přidávat. Program nezapojí vývody pro žhavení, záleží na konstruktérovi, jaké si zvolí spoje na desce v programu. Součástí je i zdroj anodového napětí a zdroj žhavení, zdroje jsou rovněž vytvořeny v programu Eagle. Vše je pak vyrobeno ve školní dílně, ve které je možnost vytvoření prokovené desky. Tuto možnost jsem využil u předzesilovače, velice mě usnadnila práci a vyvarování se možných chyb při pájení. Zdroje z důvodu složitosti technologie nemuseli být prokoveny.

Ke konci práce jsou uvedeny výsledky měření, výsledná charakteristika odpovídá kmitočtové charakteristice RIAA simulované v programu PSpice. Pro zajímavost jsem uvedl i ukázkou moderních gramofonů.

2 Elektronky

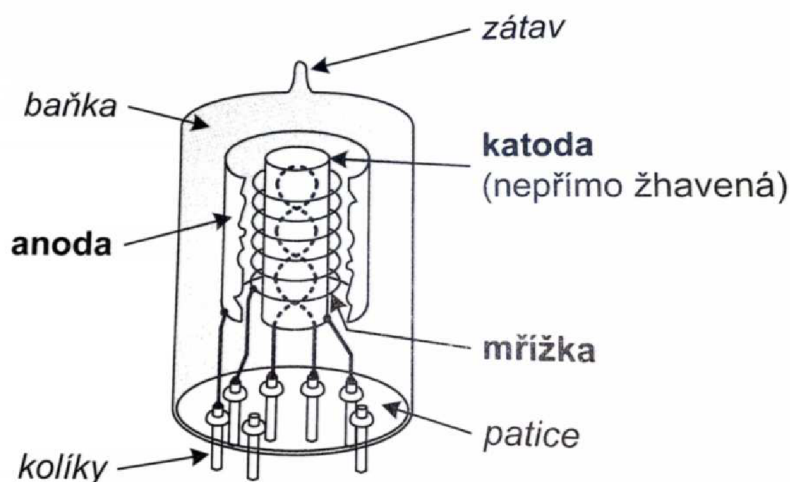
2.1 Základy historie elektronky

Známý vynálezce T. A. Edison zjistil, že ve vakuu teče z rozžhaveného vlákna žárovky elektrický proud. Britský fyzik J. A. Fleming zatavil do vakuové baňky žárovky destičku, na kterou přiváděl různá napětí. Při kladnějším napětí oproti vláknu začíná téct elektrický proud. Jev vedení elektrického proudu lze vysvětlit pohybem nosičů náboje (záporně nabitě elektrony) směrem od záporně nabitě elektrody *katody* ke kladně nabitě elektrodě *anodě*. Tento prvek se dvěma elektrodami se nazývá dioda. Diody se hlavně využilo k usměrnění střídavého proudu, později se využití vedení proudu ve vakuu prostřednictvím emise elektronů ve formě energie tepelné a světelné (fotony).

Tématem řízení proudu ve vakuu se zabývalo mnoho vědců. Jedním z nich se stal Lee de Forest, který si nechal v roce 1907 v New Yorku patentovat součástku pod názvem *Audion*, do níž byla vložena mezi katodu a anodu další elektroda ve tvaru drátěné mřížky. Touto mřížkou mohly elektrony nejen procházet, ale přivedením napětí bylo možno ovládat proud elektronů mezi katodou a anodou. Vznikne tak elektronka se třemi elektrodami – *trioda*. Trioda se stala prvním zesilovacím prvkem, která měla v oblasti vývoje elektroniky velký význam.

2.2 Princip elektronky

Elektronka – trioda, se skládá z katody (obvykle nepřímo žhavená žhavicím vláknem), drátěné mřížky a vnější kovové anody, všechny tyto části jsou umístěny ve vakuové baňce. Všechny elektrody jsou vyvedeny přes kolíky patice. Vývod anody se označuje písmenem a, katody k, mřížky g, vývod žhavicího vlákna písmenem f. Trioda je nejjednodušší zesilovací prvek. Řídící mřížkou buď elektrony prolétávají, nebo je při připojení záporného napětí odpuzuje a protékající proud se snižuje. Změnami napětí mřížky lze tak ovlivňovat proud mezi anodou a katodou. Principiální konstrukce elektronky je znázorněn na obr. 1. [1]



Obr.1. Elektronka – trioda; principiální náčrt konstrukce triody

2.3 Konstrukce elektronky

Počátky elektronek se vyvíjely z konstrukce žárovky, v níž z rozžhaveného vlákna katody emitují elektrony, tj. přímo žhavená katoda. Později došlo k vývoji dvěma druhům

nepřímo žhavené katody: thoriovaná katoda a katoda s povrchem tvořeným oxidem baria nebo stroncia. Thoriovaná katoda je při teplotě 2400 °C mnohem lepším zdrojem elektronů, než původně používané wolframové vlákno. Vyznačuje se poměrně vysokou životností a dobrou odolností na vysoké napětí. Používá se pro výkonové elektronky. Katodu s povrchem tvořeným oxidem baria nebo stroncia není třeba žhavit na tak vysokou teplotu (kolem 1000 °C), může se však zničit vysokým napětím. Používá se pro malé elektronky. V rozvoji elektronek se používalo několik způsobů napájení žhavicího vlákna. Zpočátku se nejvíce používalo napájení žhavicího vlákna stejnosměrné nebo střídavé napětí 4V (v Evropě řada elektronek A), příp. malé napětí ze žhavicí baterie 1,2 nebo 1,4 V (řada D). Později se velmi rozšířilo napájecí napětí 6,3 V, které se stalo na dlouhou dobu jakýmsi hlavním napětím pro žhavení (elektronky řady E patří k nejrozšířenějším). Vedle toho se objevily i typy elektronek pro tzv. univerzální přístroje, přizpůsobené pro napájení z různých variant tehdy rozšířených napájecích soustav 110 V, 120 V, příp. 220 V střídavých i stejnosměrných (řada V a později U). Poněvadž úmyslem bylo žhavicí vlákna všech elektronek v přístroji propojit do série, byla vlákna konstrukčně navržena pro shodnou hodnotu procházejícího proudu. Koncem 40. let se v Evropě začaly vyrábět elektronky se sériovým napájením žhavení s proudem 300 mA (řada P). Tato řada se udržela velice dlouho především zásluhou televizních přijímačů. [1]

Postupně se do baňky mezi katodu a anodu přidávaly další mřížky, kterými bylo možné do určité míry ovlivňovat anodový proud a také charakteristiku elektrony. V níže uvedené tab. 1. je uveden stručný přehled názvosloví elektronek rozlišených podle počtu mřížek. [1]

Počet mřížek	Název elektrony
0	Dioda
1	Trioda
2	Tetroda
3	Pentoda
4	Hexoda
5	Heptoda (pentagrid)
6	Oktoda
7	Enneoda

Tab. 1. Názvosloví elektronek

Baňka elektrony ještě obsahuje malý kovový držáček ve tvaru misky nebo kroužku, nad nímž je na vnitřní straně skleněné baňky stříbrná skvrna. Jedná se o tzv. *getr* (z angl. *getter*). K dosažení vysokého vakua v baňce (řádově 10^{-7} torr) je totiž třeba „spálit“ zbytky kyslíku, k čemuž slouží malé množství kovu (obvykle barium nebo jeho sloučenina) umístěné při výrobě v misce a které se po odsátí vzduchu z baňky zapálí a ve vzniklé reakci se tak spotřebuje zbylý vzduch z baňky. V důsledku této reakce vznikne uvnitř baňky charakteristická stříbrná skvrna na skle (angl. *getter flash*), která je současně indikátorem stavu vakua v baňce. Vnikne-li do baňky vzduch, skvrna se zbarví do běla, což je oxid baria a elektronka je znehodnocena. [1]

2.4 Značení a druhy elektronek

V počátcích vzniku elektronek si výrobci své produkty označovali svým způsobem. Teprve větší rozmach výroby elektronek v Evropě přinutil známé firmy, mezi nimiž patří

Philips, Telefunken a Tungram, zavést v roce 1935 jednotné značení elektronek. Později se ustálilo několik druhů značení: americké, evropské a ruské (v azbuce). Abychom to však při výběru produktu neměli jednoduché, existuje mnoho stejných typů nebo obdobných elektronek, které lze nalézt pod různými označeními u různých výrobců. V posledních dvaceti letech se množství elektronek a jejich nabídka výrazně ztenčila, protože se současně zmenšil okruh oblastí jejich použití. Postupem doby se měnil i tvar elektronek. První měli tvar podobný klasické žárovce, postupně se jejich tvar měnil a zdokonaloval, zlepšovala se technologie výroby a elektronky se stávaly menšími. Zajímavým vývojem prošel i způsob připojení jednotlivých elektrod z baňky. Nejdříve měli vyvedeny anodu a mřížku přímo ze skleněné baňky, poté se začaly vyrábět elektronky s různými druhy kolíkových (nožičkových) patič. Elektronka se poté zasouvala do objímky připevněné na šasi zařízení, což umožňovalo snadnější výměnu. [1]

Firma	Země	Logo
JJ electronic (označována také jako TESLA)	Slovensko	
Sovtek	Rusko	
Western Electric	USA	
SINO	Čína	
EI Niš	býv. Jugoslávie	

Tab. 2. Příklady výrobců elektronek

Elektronky lze také rozdělit:

Podle účelu:

- Usměrnovací (dioda)
- Zesilovací (trióda, tetóda)
- Nelineární, spínací (thyatron, krytron)
- Indikační
 - magické oko - elektronka vybavená luminiscenční vrstvou, užívaná ke zobrazování intenzity signálu
 - doutnavka
 - digitron
- Zobrazovací (obrazovka)
- Mikrovlnné (magnetron)

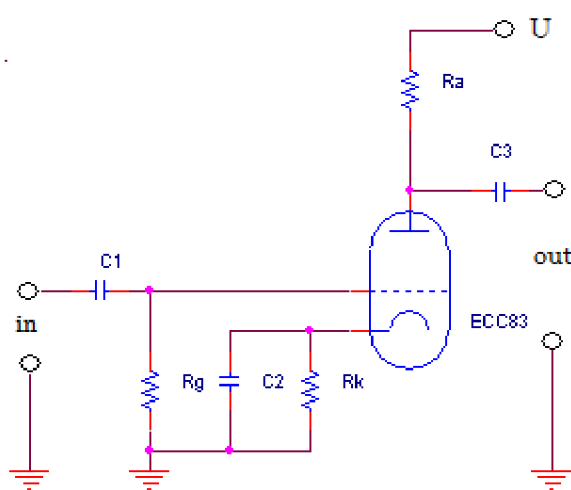
Podle druhu žhavení:

- přímo žhavené - žhavicí vlákno je zároveň katodou
- nepřímě žhavené - katoda není vodivě spojena se žhavicím vláknem

Elektronky jsou žhaveny elektrickým proudem a mohou být přímo nebo nepřímě žhaveny. Přímě žhavené katody se vyznačují tím, že emitujícím kovem přímo protéká žhavicí proud. Rozdělujeme je do skupin:

- vlákna z čistých kovů (např. wolfram - vysokou teplotou se katoda rychle rozprašuje, vlákno se v nejvíce porušeném místě snadno přepálí nebo zlomí.)
- povlaková, pokrytá kysličníky (pro malé výkony, umožňují snížení teploty vlákna při dobré emisi elektronů)
- kovová vlákna s povlakem silně emitujících kovů (Nanášení emisní vrstvy na vlákna se provádí protahováním vlákna vhodnými roztoky nebo usazováním baryových par. Povlaková vlákna umožňují při stejné emisi elektronů snížení teploty s následným prodloužením životnosti elektronky a úsporami energie v důsledku menšího žhavicího proudu.)

2.5 Příklad použití elektronky v základním zapojení zesilovače



V základním zapojení zesilovače použijeme jednu triodu z dvojité triody typu ECC83 v zapojení se společnou katodou, tzn. Katoda je společnou elektrodou jak pro vstupní, tak pro výstupní obvod. Hodnoty kondenzátorů C1 až C3 se stanoví s ohledem na kmitočet přenášených signálů. Je-li dána velikost napájecího napětí U , můžeme navrhnout hodnoty odporů R_a , R_k (resp. R_g) tak, aby zesilovač pracoval pokud možno v lineární oblasti charakteristiky elektronky (s malým zkreslením). Hodnoty typického pracovního bodu elektronky ECC83 najdeme v katalogu. [1]

Obr. 2. Základní zapojení elektronky jako zesilovače

3 Problematika předzesilovače pro přenosku

3.1 Přenoskové raménko

Přenoskové raménko je nosná část přenosky. Musí umožňovat co nejkvalitnější mechanické snímání záznamu zvuku pohybem přenosky po desce v oblouku, ale i ve vertikální rovině. Z hlediska kvality zde hraje roli návrh raménka, použitý materiál raménka a kloubu, důležité jsou také ložiska a další řada věcí. Dále je požadavek nastavování optimální svislé síly a boční síly. Raménko z důvodů snížení vibrací na minimum by mělo být co nejtužší při co nejnižší minimální hmotnosti. Proto jsou výhodnější rovné trubky. Pro všechny tyto nároky není koupě výborného raménka zrovna lacinou záležitostí. První raménka řekněme kolem roku 1930 byla velmi těžká. Tehdejší snímací jehly vyžadovaly svislé síly na hrot VTF i nad 1000 miliNewtonů, v letech 60tých již neustálým vylepšováním technologií klesla na řádově 10mN. Bylo toho docíleno také snížením hmotnosti raménka a zlepšováním kvality ložisek, začali se používat nové materiály, např. uhlíková vlákna. [2]



Obr. 3. Ramínka

3.2 Přenosky

Přenoska je zařízení, které snímá hudební signál ukrytý v drážkách naší oblíbené gramodesky a přenáší nebo také přeměňuje zvukovou stopu v drážce na elektrický signál. Bývá uchycena na raménku. [2]

Používají se dva typy a to MM a MC přenosky:

MM (Moving Magnet) přenosky s pohyblivými magnety mají výhodu vyššího výstupního napětí a vyšší poddajnosti chvojky a z toho vychází nižší svislá síla na hrot. Další výhodou jsou z důvodu vyššího výstupního napětí menší nároky na předzesilovač.

Nevýhodou je omezení horního frekvenčního rozsahu. I tak se dají i dnes pořídit slušně hrající MM přenosky. Dnešní highend dává přednost ale MC. Např. velmi oblíbené jsou namátkou přenosky od Grado Pro-ject K6, která také zpívá až do 50KHz, nebo Ortofon OMB5E (neskutečně nízká cena při dobrém zvuku).

MC (Moving Coil) přenosky s pohyblivými cívkami mají nižší výstupní napětí a nižší poddajnost, z toho vychází potřeba vyšší svislé síly na hrot a potřeby kvalitnějšího MC předzesilovače. Také u dražších přenosek je již důležité předem vědět, zda máme pro ni vhodné dostatečně robustní raménko s odolností vůči rezonancím. Jako všude v hifi, vše souvisí se vším. Odměnou za to je dosažení díky nízké impedanci malé citlivosti na kapacitu propojovacího kabelu k zesilovači, lepší schopnost rychlého zpracování impulsních signálů, díky použití velkých magnetů lze docílit menšího zkreslení. Další podstatnou věcí je vyšší horní frekvenční rozsah, který tak dobře působí na naše podvědomí při poslechu. My již zvuk nad 20kHz neslyšíme, ale pozitivně vnímáme. Velmi oblíbená a doporučovaná pro vyšší modely Pro-ject gramofonů je MC přenoska Sumico Blue Point 2, má frekvenční rozsah cca 15Hz až 35KHz. Vyšší modely přenosek mají až 50KHz. [2]



Obr. 4. Přenosky

3.3 Hrot přenosky

Pro dobrý zvuk je třeba se věnovat i samotnému hrotu. Dnes máme výhradně diamantové hroty, buď ze syntetického, u nejdražších modelů přírodního materiálu. O kvalitě svědčí stupeň vyleštění povrchu viditelném až při cca 200x zvětšení. Jde i o tvar vrcholu. Pro dobrý zvuk je důležité hrot pečlivě udržovat, čistit speciálním kartáčkem, popř. používat speciální čistící prostředek na hroty přenosek, který není zrovna nejlevnější. [2]

3.4 Záznamová charakteristika

Aby bylo možno maximálním způsobem využít možností mechanického záznamu, jsou nezbytně nutné určité korekce kmitočtové charakteristiky již při výrobě matrice. Kdybychom do mechanického záznamového rydla, pracujícího vesměs na elektromagnetickém principu, přiváděli pro všechny kmitočty nahrávaného signálu stejné vstupní napětí, pak by se podle indukčního zákona zvětšoval proud směrem k nízkým kmitočtům a naopak zmenšoval směrem k vysokým kmitočtům. Protože výchylka rycího hrotu je přibližně úměrná protékajícímu proudu, byla by do matrice zapisována při vysokých kmitočtech zaznamenávaného signálu drážka s velmi malou amplitudou (velmi úzká) a naopak při nízkých kmitočtech nahrávaného signálu drážka s amplitudou nadměrně (neúměrně) velkou. To by jednak mělo za následek, že by signály vysokých kmitočtů byly nahrávány s úrovní blízkou úrovni šumu a naopak signály nízkých kmitočtů by byly nahrány s takovou amplitudou, že by je nebylo možno běžnými snímacími systémy zpracovat, a jednak by bylo nutno podstatně zvětšit rozteč drážek, čímž by se neúměrně zmenšovala kapacita desek. Proto byl mezinárodně stanoven průběh záznamové charakteristiky, aby byla

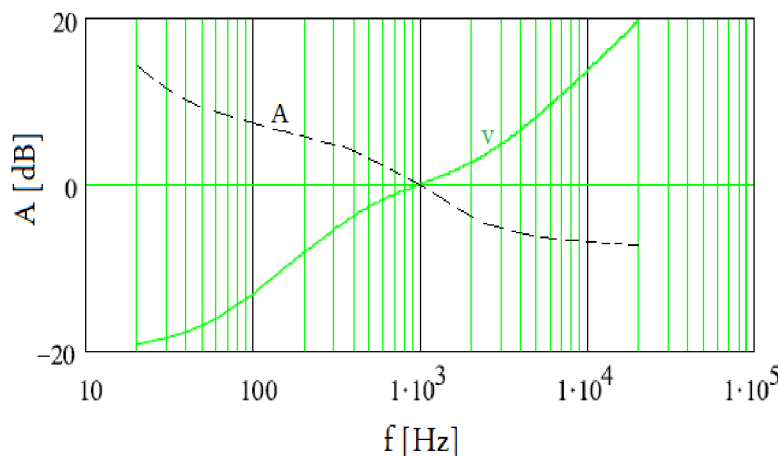
gramofonová deska z hlediska výše uvedených požadavků využita optimálně. Při záznamu signálu sinusového průběhu sleduje hrot rydla v drážce dráhu ve směru kolmém k drážce. Tato dráha, vyjádřená v cm/s, se nazývá stranovou rychlostí. Její efektivní hodnota je vyjádřena vztahem:

$$V = 4,44fA \quad [3]$$

kde v je efektivní stranová rychlost,

f kmitočet,

A amplituda.



Kmitočet	Stranová rychlost	Amplituda
f[Hz]	v[dB]	A[dB]
20	-19,3	14,7
50	-16,9	9,1
100	-13,1	6,9
300	-5,5	5
500	-2,6	3,4
700	-1,2	1,9
1k	0	0
3k	4,7	-4,8
5k	8,2	-5,8
10k	13,7	-6,3
15k	17,2	-6,4
20k	19,6	-6,4

Obr. 5. Záznamová charakteristika, používaná pro záznam signálu (RIAA); v je průběh záznamové rychlosti a A jsou odpovídající výchylky (amplituda)

Tab. 3. Hodnoty k Obr. 5.

Na obr. 5 je průběh závislosti stranové rychlosti na kmitočtu podle RIAA (Record industry association of america – záznamové průmyslové sdružení Ameriky). Vidíme, že rychlost záznamu (stranová rychlost) se téměř přímo úměrně zvětšuje s kmitočtem. Ve skutečnosti není tento průběh zcela přímo úměrný a je vyjádřen třemi časovými konstantami $\tau_1 = 3180 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 318 \mu\text{s}$, $\tau_3 = 75 \mu\text{s}$. Díky této výrazné kmitočtové úpravě se dosáhlo velmi dobrého odstupu rušivých napětí i u signálů nejvyšších zaznamenávaných kmitočtů a současně i přijatelné maximální výchylky hrotu i při záznamu signálů nejnižších kmitočtů. To vše umožňuje zajistit dostatečně dlouhou dobu hraní gramofonové desky, protože lze drážky ukládat relativně blízko vedle sebe. Tento způsob záznamu se nazývá, nikoli ovšem zcela přesně, záznamem s konstantní amplitudou. [3]

Při reprodukci gramofonových desek je třeba zajistit, aby na výstupu snímačích systému byla velikost napětí nezávislá na kmitočtu, tj. aby výstupní napětí bylo v celém přenášeném kmitočtovém rozsahu pokud možno konstantní pro signály všech kmitočtů. Použije-li se jako snímač krystalový nebo keramický systém, pak jsou uvedené požadavky splnitelné relativně velmi jednoduše, neboť tyto systémy mají tu vlastnost, že jejich výstupní napětí je úměrné výchylce hrotu, tedy amplitudě záznamu. Protože záznam na deskách je pořizován s přibližně konstantní amplitudou, dostaneme na výstupu těchto snímačů požadovaný lineární průběh výstupního napětí bez velkých problémů. V této souvislosti je nutno připomenout, že krystalové a keramické snímače, tedy snímače, jejichž výstupní napětí je úměrné „výchylce“ drážky, by měly být rovněž opatřeny korekčními obvody, protože ani charakteristika průběhu výchylky drážky v závislosti na kmitočtu není lineární. Všechny moderní snímačí systémy tohoto typu jsou však již výrobci upravovány vhodnou volbou

mechanických transformací v systému tak, že jejich výstupní napětí je přibližně lineární v závislosti na kmitočtu při snímání záznamu na gramofonové desce, nahrané podle záznamové charakteristiky RIAA.

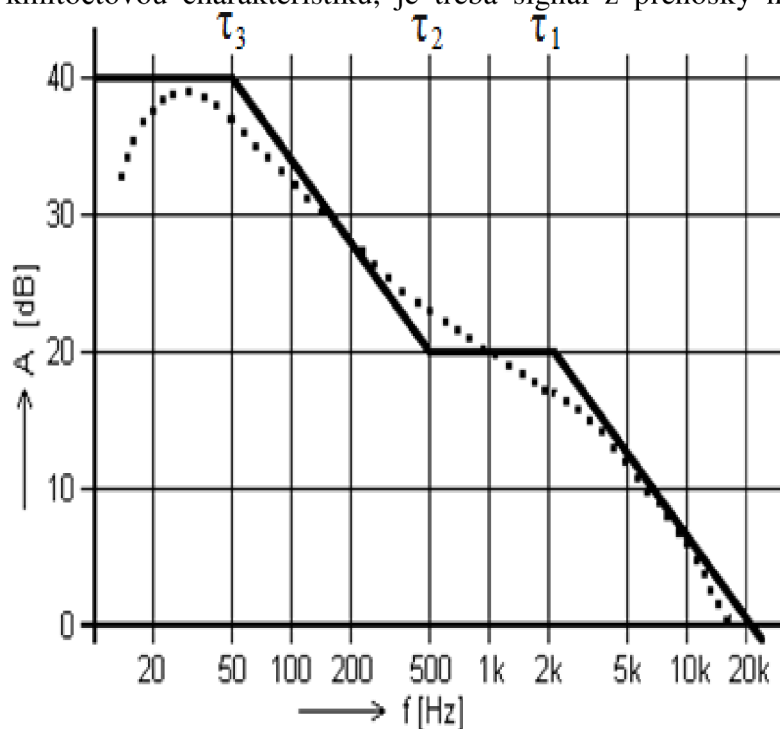
Systémy pracující na magnetodynamickém principu mají podstatně větší poddajnost hrotu jak ve vodorovném, tak i ve svislém směru a umožňují proto používat je s mimořádně malými svislými silami. Určitou nezanedbatelnou nevýhodou je však skutečnost, že jejich výstupní napětí je úměrné nikoli amplitudě, ale rychlosti snímacího hrotu. Podíváme-li se na obr. 5, vidíme, že se tedy bude výstupní napětí magnetodynamických snímacích systému úměrně zvětšovat se zvyšujícím se kmitočtem snímaného signálu. Tyto snímací systémy nelze proto připojit na vstup běžného nf zesilovače přímo – jejich výstupní signál je třeba nejprve upravit korekčním předzesilovačem. Jeho úkolem je jednak zesílit relativně malé výstupní napětí magnetodynamického snímače (přibližně 50x menší než u vložek krystalových snímačů) a jednak upravit výstupní napětí tak, aby byla vykompenzována jeho kmitočtová závislost. Korekční předzesilovač pro magnetodynamické snímací systémy musí mít proto průběh kmitočtové charakteristiky zrcadlový ke křivce v na obr. 5. (korekce RIAA). Jak z tohoto obrázku vyplývá, je zisk předzesilovače v oblasti nízkých kmitočtů velmi velký. Proto se u předzesilovačů kladou zvětšené nároky na dokonalou filtraci napájecího napětí a případně i na ochranu předzesilovače proti indukovaným napětím nízkých kmitočtů, např. z pohonu gramofonu. [3]

4 Korekční předzesilovač

Korekční předzesilovač má dva hlavní úkoly:

- 1) Zesílit nepatrné napětí z gramofonové vložky
- 2) Speciálním korekčním členem upravit kmitočtovou charakteristiku signálu z desky

Výstupní napětí snímače - gramofonové přenosky - je úměrné rychlosti hrotu. Čím vyšší kmitočet, tím je napětí větší. Vyšší kmitočty je třeba proto při přehrávání potlačit. To je velmi výhodné, neboť se zároveň zvětší odstup signálu od šumu. Rovněž při záznamu se signál kmitočtově upravuje tak, aby při přehrávání bylo dosaženo co nejlepšího kompromisu mezi maximální vybuditelností, zkreslením a odstupem od šumu. Pro vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku, je třeba signál z přenosky nejen zesílit, ale také kmitočtově



upravit dohodnutým způsobem. Nejčastěji se používají korekce podle křivky RIAA, viz obr. 6. Časové konstanty odpovídající zlomovým kmitočtům jsou $\tau_1 = 3180 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 318 \mu\text{s}$, $\tau_3 = 75 \mu\text{s}$. Méně je známo, že někteří výrobci používali odlišné záznamové korekce a pro správné přehrávání takových desek byly zapotřebí i jiné časové konstanty korekcí ve snímacím zesilovači. Rovněž desky pro 45 ot/min mají odlišné korekce. Používané časové konstanty jsou v tab. 4. [4]

Obr.6. Kmitočtová charakteristika RIAA

t1 [μs]	t2 [μs]	t3 [μs]	ot/min r.p.m.	Výrobce Manufacturer
75 50	318 318	3180 3180	33 1/3 45	Electrorecord, R.C.A. ... (RIAA)
100 50	318 318	2720 3180	33 1/3 45	E.M.I., Balkanton, ...
100 50	318 318	1590 3180	33 1/3 45	C.B.S., Supraphon, ...
100 57	398 318	1590 1590	33 1/3 45	copie coloană sonoră film sau înregistrare specială

Tab. 4. Časové konstanty pro různé výrobce desek

t [μs]	f [Hz]
3180	50
318	500
75	2122
2720	58,5
1590	100
398	400
100	1592
57	2792
50	3183

Tab. 5. Převod časová konstanta - kmitočet

4.1 Korekce-pasivní, aktivní

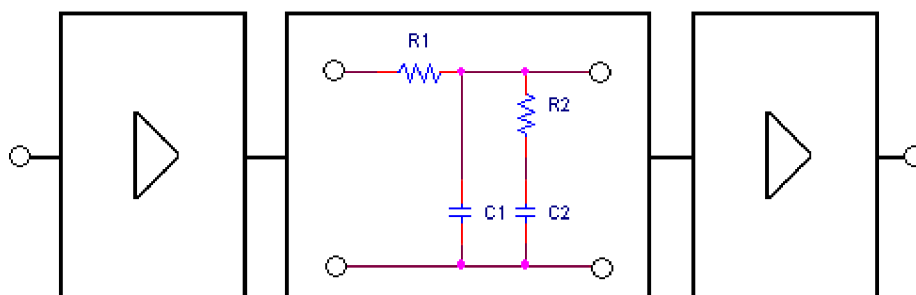
Výstupní napětí dynamické přenosky je v prvním přiblížení úměrné rychlosti pohybu hrotu (dvojití bodů jeho styku s drážkou). Pokud by tato rychlost byla úměrná okamžité hodnotě zaznamenávaného napětí, chovala by se v takovém přiblížení přenoska jako lineární člen. Z technických důvodů je však nutné signál upravovat kmitočtovou korekcí tak, aby amplituda záznamu na vysokých kmitočtech nebyla příliš malá (vliv nedokonalosti povrchu drážky by se příliš uplatňoval) a na nízkých zase příliš velká (nebezpečí prořezání do sousedních drážek). Tuto korekci je nutné při snímání vykompenzovat reciprokou korekcí, která je popsána přenosovou funkcí:

$$F(s) = \frac{1 + s\tau_2}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_3)} \quad [3]$$

Časové konstanty jsou stanoveny normou a jejich vlastnosti jsou: $\tau_1 = 3180 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 318 \mu\text{s}$, $\tau_3 = 75 \mu\text{s}$. Poznamenejme, že celkový amplitudový zdvih korekce, tj. rozdíl mezi největší a nejmenší hladinou přenosu je 40 dB. Kmitočtovou charakteristiku podle uvedeného vzorce je možné realizovat různými způsoby, a to především pasivními obvody, aktivními obvody (tj. obvody s kmitočtově závislou zpětnou vazbou) a jejich kombinací.

Pasivní korekce

S ohledem na odstup rušivých napětí nepřichází v úvahu zařazení korekce ještě před první zesilovací stупeň. Pasivní korekční obvod zeslabí signál na vysokých kmitočtech až o 40 dB. Při typickém výstupním napětí přenosky řádu milivoltů by bylo vyloučené zkonstruovat zesilovač tak, aby se šum neuplatnil naprosto rozhodujícím způsobem. Proto se pasivní korekční článek zařazuje vždy až na první zesilovací stупeň. Aby se vyloučil vliv případné zátěže na chování korekčního článku, zařazuje se za něj další zesilovač, který je stejně jako první stупeň lineární. Blokované schéma takového zesilovače je na obr. 7.

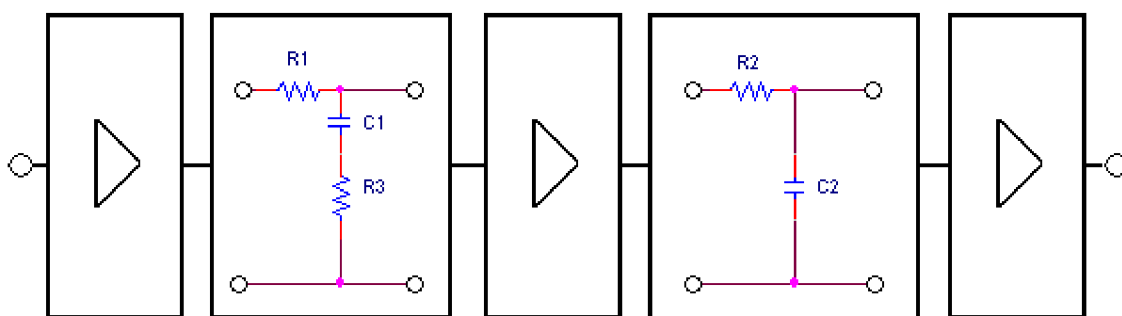


Obr. 7. Blokové schéma zesilovače s pasivními korekcemi

Nevýhodou takového zapojení je to, že po prvním zesílení je signál opět zeslaben, a to v závislosti na kmitočtu až o 40 dB. Pokud by druhý zesilovací stupeň měl stejné šumové parametry jako první a jeho šum se neměl podstatně uplatnit, muselo by zesílení prvního stupně být větší než 40 dB. To je však nevýhodné z hlediska přebuditelnosti. Toto platí pro operační zesilovače a tranzistory, které jsou až na speciální výjimky limitovány napájecím napětím (u operačních zesilovačů ± 22 V) a tím dané přebuditelnosti. Zde je prostor pro elektronky, které používají mnohem vyšší napájecí napětí.

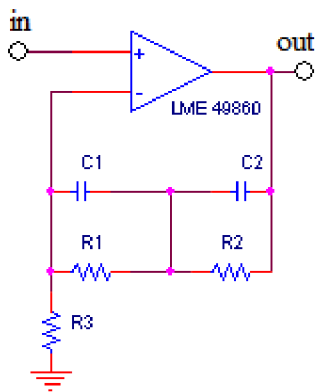
Proto se zejména u moderních operačních zesilovačů volí obvykle kompromis s tím, že šum druhého stupně se uplatní jen u vyšších kmitočtů. Druhou možností je rozdělení korekce do dvou sekcí, mezi nimiž je zařazen vyrovnávací zesilovač. Zde již kompromis není nutný, nebo alespoň není tak kritický.

Příslušné blokové schéma je na Obr. 8.



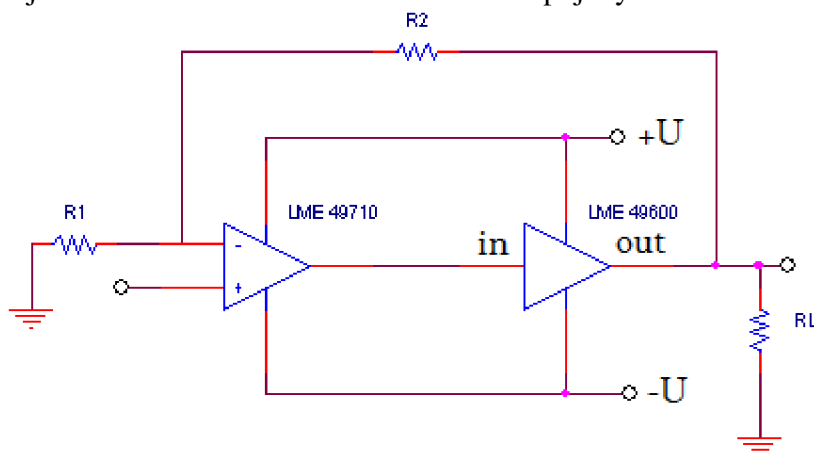
Obr. 8. Blokové schéma zesilovače s rozdělenými korekcemi

aktivní korekce



Obr. 9. Zesilovač s aktivními korekcemi

Kompromisem mezi pasivní a aktivní korekcí je takové uspořádání, kde se část korekce provádí pasivně a část ve zpětné vazbě. Tato varianta je jistě velmi vhodná pro moderní operační zesilovače a lze s nimi uskutečnit velmi kvalitní zapojení. Časem bude jistě zajímavé srovnání s dnes HIGH-END zapojenými elektronkových zesilovačů. Jako příklad



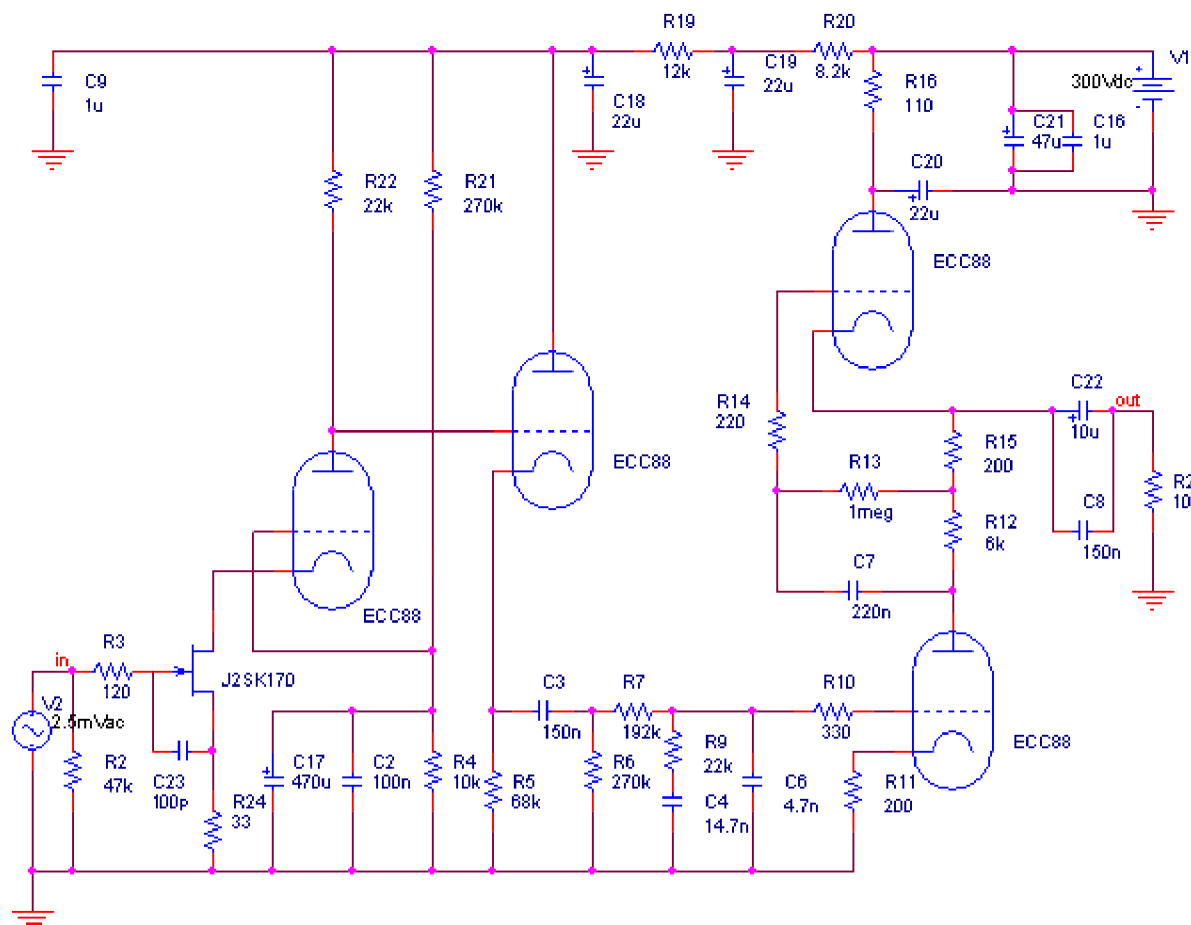
Obr. 10. Zapojení s výstupním bufferem

zkreslení 0,00003%, mají rychlost přeběhu 40 V/ μ s, k nim je novinka výstupní buffer, který produkuje při stejném zkreslení výstupní proud 250 mA, šířku pásma 180 MHz a rychlost přeběhu 2000 V/ μ s. Jedná se o typ LME 49600. S těmito obvody se nedávno objevilo zajímavé zapojení předzesilovače pro magnetickou vložku, bohužel s korekcemi ve zpětné vazbě. I tak toto zapojení ukazuje pokrok ve vývoji moderních technologií. [5]

Přesto je zajímavé sledovat obrovskou renesanci elektronek, zejména ve světě, kde přibývalo mnoho jejich výrobců. Samostatná kapitola jsou hudební a zejména kytarové zesilovače, kde je dnes u jejich výrobců naprostý návrat, kromě nejlevnějších modelů, k elektronekám. U třídy HIGH – END není situace tak jednoznačná, jsou zde zastánci a odpůrci, své sehrává i provedení těchto zesilovačů, kde některé za nemalé peníze představují doslova umělecké kreace. Na základě různých zveřejněných poslechových testů v odborných časopisech se ale domnívám, že nemají jen tyto vzhledové výhody (v jednom testu německého elektronkového zesilovače bylo jako poslední argument uvedeno – a v noci krásně svítí), ale i skutečné přednosti, takže nejde jen o nějaké „retro“. Rozhodně se domnívám, že popsany zesilovač s kvalitními pasivními korekcemi je v současné době jedno z nejlepších

řešení, zejména po stránce dynamických vlastností a při pečlivém provedení vyhoví i k nejkvalitnějším gramofonům, které zaznamenaly také velkou renesanci (i vinylové desky).

4.2 Zapojení korekčního předzesilovače s elektronkami

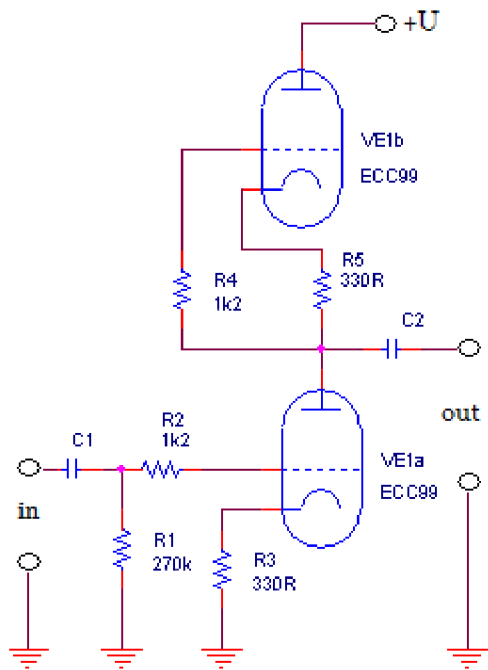


Obr. 11. Korekční předzesilovač s elektronkami

Zapojení lze rozdělit na tři části:

První část obsahuje vstupní zesilovač, který musí zesílit napětí z gramofonové vložky, které je obvykle kolem 3mV (systém MM), u systému MC je desetkrát nižší! Z tohoto důvodu je v něho kladen důraz na šumové parametry a dostatečné zesílení. Zde je použito zapojení nízkošumového FET tranzistoru, který je přímo navázán do katody elektronky, která pracuje se společnou mřížkou. Je také přímo navázána na mřížku druhé triody, pracující jako katodový sledovač (jde o dvojitou triodu v jedné baňce). Tato kombinace umožňuje zesílení asi 48dB při malé výstupní impedanci katodového sledovače. Ta je vhodná pro navázání druhé části.

Ve druhé části je korekční člen nutný pro splnění charakteristiky RIAA. Tento člen má zrcadlovou charakteristiku normy, kterou je v podstatě „nahrána“ vinylová deska a díky tomu je na výstupu rovná kmitočtová charakteristika. Zde je použit pasivní člen. Ten má výhodu lepších dynamických parametrů, než při použití zpětných vazeb za cenu složitějšího návrhu celkového uspořádání součástek z hlediska možných rušivých napětí, brumů apod. Je nutno také počítat s jeho pasivním útlumem. Zde je nutno z hlediska nejlepších dynamických parametrů použít nejkvalitnější kondenzátory z materiálu polypropylen (jsou to výrobky firmy WIMA a vhodné typy jsou FKP2, FKP1, MKP). Toto platí i pro vazební kondenzátory.

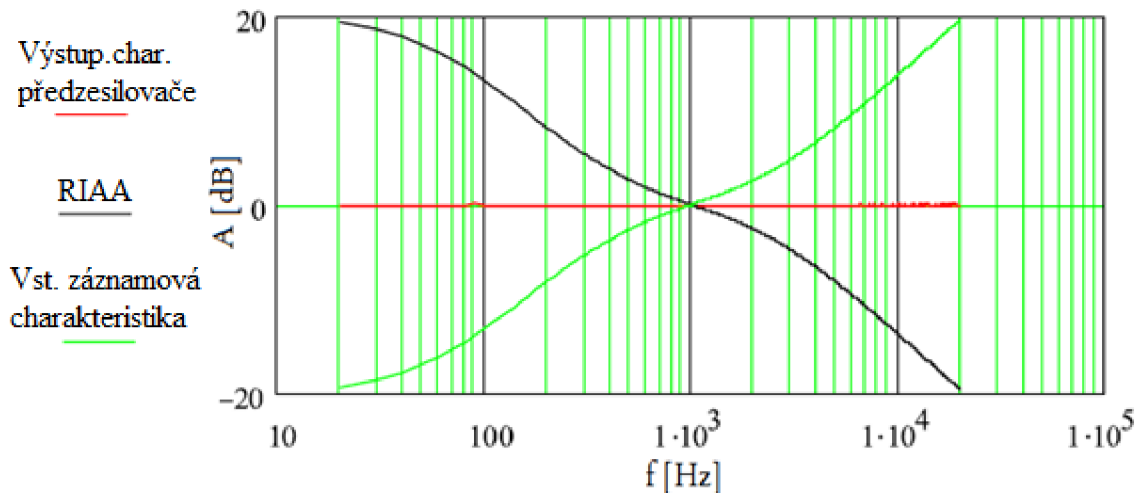


Obr. 12. Princip μ -sledovače (SRPP)

Třetí část je určena pro výstupní zesilovač s aktivní zátěží, s jejíž pomocí lze dosáhnout výstupního signálu s velmi dobrou symetrií kolem středu napájecího napětí. Principem je zapojení druhé elektronky místo anodového zatěžovacího odporu. Toto zapojení se v anglosaské literatuře často nazývá μ -sledovač (*μ -follower*, *Mu follower*, *Mu amplifier*, *Cascoded Cathode Amplifier*) nebo SRPP (z angl. *Series Regulated Push-Pull*). Jako jednoduché principální schéma jsem uvedl na obr. 12 (s hodnotami součástek pro dvojitou triodu ECC99). Při tomto zapojení jsou shodné hodnoty odporů na katodách obou elektronek (tj. $R_3 = R_5$). V klidovém stavu je na anodě dolní elektronky (VE1a) napětí rovné polovině napájecího napětí, takže výstupní signál bude symetrický. Je třeba, aby i elektronky měly velmi podobné parametry. [1]

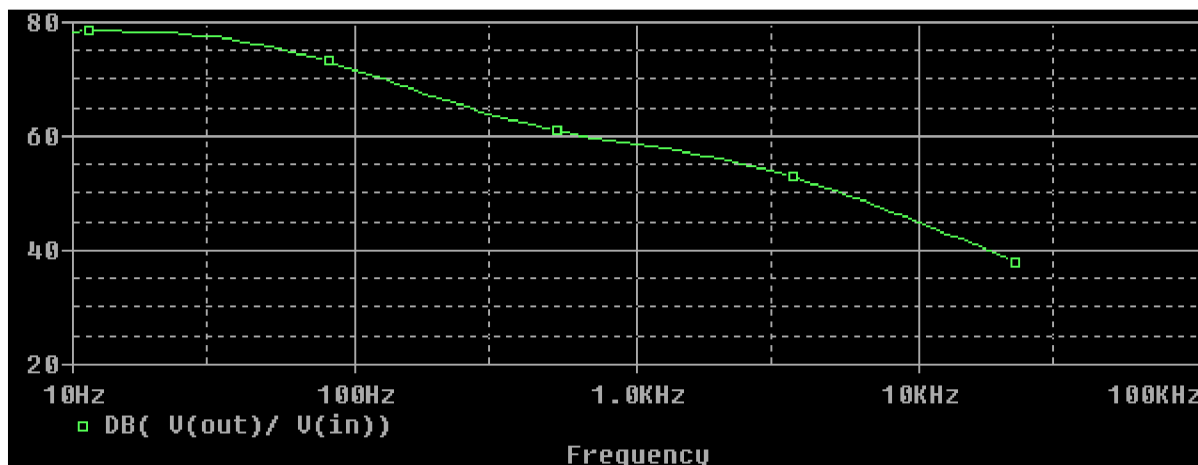
Pozn.: Vzhledem ke vstupní impedanci elektronek není hodnota odporů R_2 a R_4 kritická.

4.3 Porovnání charakteristiky RIAA



Obr. 13. Výsledná charakteristika korekčního předzesilovače

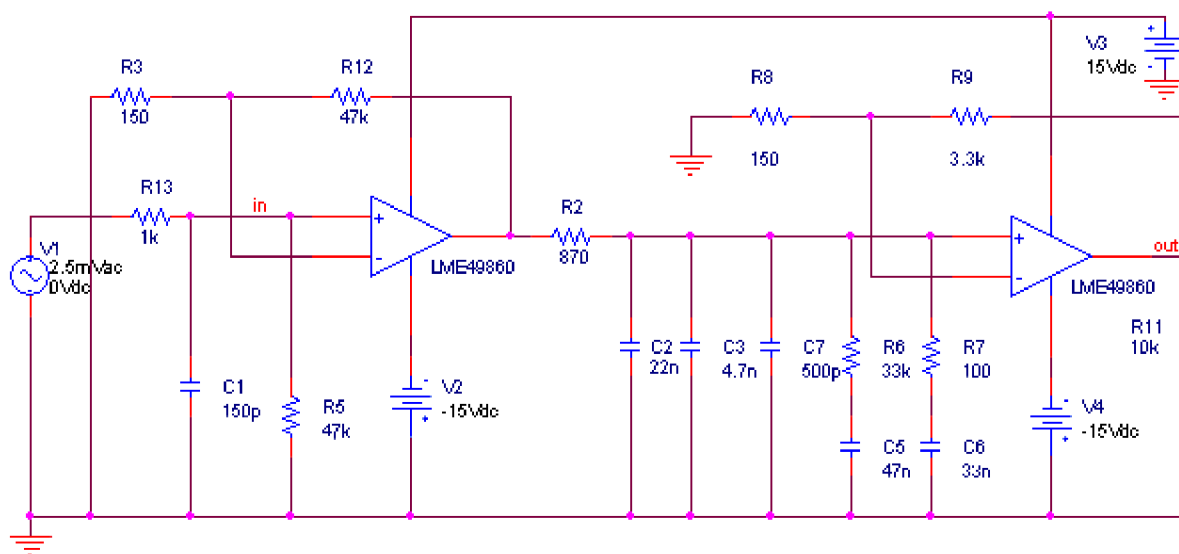
Sečtením obou charakteristik (záznamové charakteristiky a charakteristiky RIAA) vznikne výsledná charakteristika, která je požadována na výstupu korekčního předzesilovače. Zapojení korekčního zesilovače s elektronkami podle obr. 11 jsem odsimuloval v programu PSpice. Sice byly se simulací problémy, protože elektronky nejsou v knihovnách PSpice. Musel jsem najít od výrobce model pro Spice a vytvořit odpovídající značku dané elektronky.



Obr. 14. Simulace korekčního předzesilovače s elektronkami v programu PSpice

4.4 Zapojení s operačními zesilovači

Operační zesilovače se stále zdokonalují, ale mají i své nevýhody, které popíšu níže. Uvedu zde příklad zapojení s moderními zesilovači LME 49860. [6]



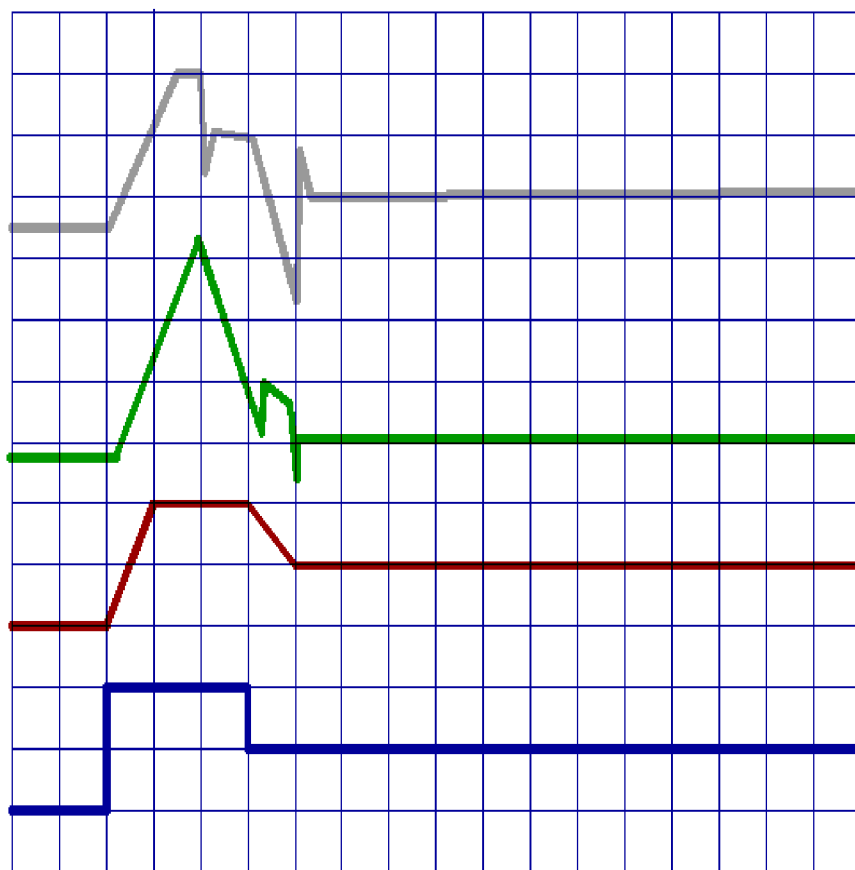
Obr. 15. Korekční předzesilovač s operačními zesilovači

5 Srovnání zapojení elektronka – operační zesilovač

5.1 Problematika zkreslení TIM a SID

Zkreslení TIM

S nahrazováním elektronek tranzistory souvisí počátek hledání věrné reprodukce, hledání nejrůznějších zkreslení atd., tedy hnutí Hi-Fi. V době elektronek byla zapojení rozdělena na jednočinná a dvojčinná, pracující ve třídě B. Pamětníci nám dají za pravdu, že měla skvělý zvuk, který nebylo nutno moc vylepšovat. Svou roli sehrál jistě jeden fakt - nebyly používány silné zpětné vazby pro eliminaci zkreslení. Převodní charakteristiky elektronek nevykazují silné nelinearity, tak ani nebyl důvod pro zavedení záporných vazeb. Tranzistorové zesilovače "hifisté" hodnotili v té době velmi špatně, jako nepřirozeně znějící, se zkreslením a "roztřepenými" výškami.



Uvedené zkreslení má na svědomí silná zpětná vazba a nedostatečná rychlost přeběhu. Tranzistorové zesilovače se bez zpětných vazeb vůbec neobejdou, v počátcích této techniky leckdy dokonce platilo - čím víc součástek, tím horší zvuk. Přitom naměřené parametry byly proti elektronek mnohem lepší, ve zkreslení až o dva řády, v odstupech rovněž. Vše souviselo s použitím germaniových tranzistorů, které byly dost "pomalé". [7]

Obr. 16. Zkreslení TIM a související SID

Zkreslení SID

Zkreslení TIM způsobí přítomnost záporné zpětné vazby a je svázáno se zkreslením SID - nízká rychlost přeběhu. Projevuje se neschopností zesilovače sledovat vstupní signál. Nastává hlavně při buzení výškami směrem k maximálním úrovním výstupního výkonu. Jev snadno zpozorujeme při přenosu řeči na sykavkách s, š, ž., které zesilovač doslova "rozbije" ("televizní výšky"). Projevuje se nejvíce při silném signálu o vysokém kmitočtu, a má za následek značně poslechově nepříjemné zkreslení. Při rychlé změně vyjádřené modrým průběhem - ta je pro jednoduchost naznačena obdélníkovým signálem superponovaným na stejnosměrné složce, by došlo na výstupu zesilovače s pouze omezenou rychlostí přeběhu ke zkreslení vyjádřeném červenou křivkou. Záporná zpětná vazba způsobí vznik překmitu, viz zelený průběh. Překmit vznikne díky snaze zpětné vazby "dotáhnout" výstup na obdélníkový tvar. Protože je ale frekvenčně kompenzovaná, dojde vinou kompenzace k neadekvátnímu přebuzení koncového stupně k výskytu špičky. Ta by na zvuk neměla ještě katastrofální následky, kdyby nedošlo k její limitaci a "protažení" díky špatně navrženému budiči. Protažení - viz horní šedivý průběh znamená katastrofální vliv na zvuk. Doba setrvání v limitaci může dosáhnout hodnot kolem 100us, a "odtrh" zvuk silně degraduje. Problém degradace zvuku je složitější o fakt, že zkreslení se vzájemně ovlivňují, ve výše uvedeném případě může dojít i k výskytu intermodulačního zkreslení vlivem průniku přes napájecí zdroj do signálové části. [7]

Pokud na vstup zesilovače přivedeme skokovou změnu napětí, na výstupu dostaneme napětí se zpožděním, úměrným rychlosti přeběhu SR zesilovače. Zpětná vazba snižuje zkreslení ale jen do strmosti signálu SS menší než je SR zesilovače, pak se zkreslení prudce zvyšuje. Větší záporná ZV vyžaduje větší kompenzační kapacity z důvodu zajištění stability, aby nedošlo k nepříznivým fázovým poměrům a k rozkmitání zesilovače. Tím ještě více zmenšíme SR. Je možno sice konstrukčně problém obejít minimální nebo žádnou zpětnou vazbou, zhorší se ale silně zkreslení a šum. Lepší je ale dát si práci s návrhem koncového stupně tak, aby ke zmíněnému zkreslení nedošlo. Zkreslení lze eliminovat použitím vyššího napájecího napětí nebo ještě lépe uděláme, zajistíme -li pro kovový stupeň ve špičce krátkodobě zvýšenou úroveň napětí, pak nedojde k limitaci špičky, opět jsme u větších výkonů.

5.2 Tranzistorový jev

Tranzistorový jev je vlastnost zesilovače s velkým zesílením v otevřené smyčce a značným počtem aktivních prvků, přes které je vedena zpětná vazba. „Tranzistorovým“ jevem trpí většina tranzistorových zapojení, odtud jeho název. U zapojení s elektronkami se většinou nevyskytuje právě proto, že elektronky nejsou zapojovány se zpětnou vazbou přes mnoho stupňů a navíc nemají velké zesílení v otevřené smyčce.

Tranzistorový jev lze jednoduše popsat či změřit v zesilovači, na jehož vstup přivedeme signál s obdélníkovým průběhem, velkou amplitudou, nízkým kmitočtem a současně s ním signál s vysokým kmitočtem a malou amplitudou. Elektronkový zesilovač nepřenese příliš dokonale „obdélník“, ale neztratí signál s vysokým kmitočtem. U většiny tranzistorových zesilovačů má signál na výstupu mnohem strmější hranu „pomaleho obdélníku“, ale vlivem velkého zesílení a silné zpětné vazby se po čas přeběhu některého stupně zesilovače přebudí, zahltí a než se napětí ustálí, je signál s vysokým kmitočtem potlačen. Rovněž se nepříjemně projevuje i ostré ořezání signálu u tranzistorových zesilovačů při limitaci. Elektronkové zesilovače pracují pouze s malými a lokálními zápornými zpětnými vazbami, i když se s nelineárním zkreslením pod 0,5% jen stěží dostanou, těmito nečinnostmi netrpí a bývají výsledně hodnoceny lépe. Toto zkreslení při větších výkonech přechází v měkké omezení, které lidskému uchu tolik nevádí. Je tady ještě snad příjemnější zkreslení

sudými harmonickými jednočinných zesilovačů, ale toto jsou výsledky pouze subjektivních testů. U tranzistorových zesilovačů je situace složitější. Charakteristiky zejména bipolárních tranzistorů jsou mnohem ostřejší zakřivené než u elektronek a vlastnosti tranzistoru výrazněji závisejí na protékajícím proudu. Vzhledem k závislosti na teplotě je tu snaha šetřit příkonem a omezit vznikající teplo, při malém klidovém příkonu však vzniká přechodové zkreslení, které nelze zcela vyloučit. Navíc se může v zapojení – až na výjimky podstatně složitějším než u elektronek – i mimo koncový stupeň vyskytovat součást, která pracuje na hranici svých možností a za určitých okolností (přirozený zvukový signál se velice liší od harmonického) způsobuje nepříjemný sluchový vjem, přestože vlastnosti zesilovače při buzení harmonickým signálem a plném výkonu jsou vynikající. Poslechový dojem může být proto v příkrém rozporu s technickými parametry. [7]

Ještě bych se při této příležitosti chtěl zmínit o jedné „nectnosti“ bipolárních polovodičů a to jejich charakteristik. Toto se podle mě týká nejen koncových zesilovačů, ale i strukturně obdobně zapojených operačních zesilovačů se všemi jejich „ctnostmi a nectnostmi“. Tyto prvky mají na výstupu zesilovače v „rádoby“ třídě AB. Jde o dvojčinný zesilovač s klidovým proudem z důvodu eliminace přechodového zkreslení. Nechci zde rozebírat teorii zesilovačů na tomto principu, ale chci upozornit na některá fakta, která souvisí tímto tématem. Pravá třída AB vyžaduje koncové zesilovací prvky s parabolickou charakteristikou. Jak lze snadno zjistit, součet dvou takových charakteristik, symetrických od počátku souřadnic, je přímka. Problém je ovšem v oné charakteristice. Té se blíží charakteristice elektronek: blíž je trioda, tu ale nelze tolik vybudit jako pentodu. Snad je možné najít také vhodné tranzistory MOSFET, ale s bipolárními tranzistory to zřejmě nejde. Je pravdou, že technika struktury operačních zesilovačů značně pokročila, vyrábí se např. typy řady LME firmy National Semiconductor.

5.3 *Lampové zkreslovače*

Zkreslení u elektronky vzniká podobně jako u tranzistoru tím, že se dostáváme s pracovním bodem nebo rozkmitem signálu na okraj její charakteristiky. Hlavní rozdíl mezi elektronkou a bipolárním tranzistorem je v tom, že tranzistor je řízen proudově, kdežto elektronka napěťově. Ve standardním režimu je elektronka napájena 10-50x vyšším napětím než tranzistory. Zpracovávaný signál si v ní nemusí "proklestit cestu" tuhým polovodičem, jako je tomu u tranzistorů, nýbrž elektrony jsou za pomoci zdrojů volně emitovány vakuem z rozžhavené katody ke kladně nabitě anodě. V cestě jim v tu chvíli stojí jen řídicí mřížka (u triody) která má napěťový potenciál modulovaný kytarovým signálem. Tak mřížka tok elektronů dle signálů buď urychluje nebo brzdí. Jejich volné putování vakuem má asi základní vliv na kouzlo lampového zvuku, ve kterém je ta volnost jakoby cítit. Oproti tranzistorům je tak elektronka zvukově čistší, dynamičtější a přirozenější. Zkreslení v lampových obvodech může být samozřejmě vytvářeno i zapojením antiparalelních polovodičových nebo LED diod v signálové cestě. Potom už jde spíše než o pravý lampový overdrive, o jeho zkřížení s distortionem a zvukový výsledek tomu odpovídá. Je tak umožněno jednodušeji a laciněji dosáhnout větší limitace. Toto zapojení bohužel dnes používají i významní výrobci pro zlevnění výroby a šetření lampami v rámci efektivnějšího byznysu. [8]

Zvláštní sortou lampových zkreslovačů jsou smíšené obvody, ve kterých je většina signálové cesty tvořena polovodičovými prvky a zkreslovací obvod pak lampou. Zde může lampa pracovat s běžným anodovým napětím cca 200-300 V, nebo s nízkým 9-30 V. Typickým představitelem pro kategorii s vyšším napětím je např. Mesa/Boogie V-Twin.

Představiteli "nízkonapěťových" lampových zkreslovačů jsou pak Tube Driver od ToneWorks, Ibanez Tube King nebo Shaka Tube od Arona Nelsona. Výhodou těchto

nízkonapěťových zkreslení je kvalitní zvuk, totální napěťová bezpečnost a rozměry nelišící se mnoho od běžných krabiček.

5.4 *Tranzistorová limitace*

Bipolární tranzistor začíná zkreslovat signál, jestliže se díky velkému vstupnímu signálu nebo nastavení pracovního bodu na křivce jeho pracovní charakteristiky dostaneme na okraj rozsahu. Zde už parametry čistého přenosu sinusoidy nejsou zaručeny. Poté tranzistor produkuje zkreslený - limitovaný zvuk. Obecně je toto tranzistorové zkreslení zavrhováno pro svůj nepříjemný charakter. Různé typy tranzistorů podle materiálu a struktury použitého polovodiče zkreslují rozdílně. Křemíkové tranzistory mají ostřejší - plechovější zvuk. Germaniové tranzistory mají poněkud hladší zvuk. (Obojí myšleno v rámci zkresleného režimu daného prvku.) Unipolární tranzistory J-Fet nebo MosFet produkují průhlednější, jakoby více lampový charakter zkreslení. [7]

5.5 *Harmonické zkreslení*

Jeho vznik je způsoben nelinearitou aktivních součástek tj. diody, tranzistorů, elektronek. Nelinearity způsobují vznik vyšších harmonických složek vstupního signálu. Harmonické složky obsahují celistvé násobky frekvence vstupního signálu. Sudé harmonické složky nepůsobí tak rušivě jako liché. Nejnepříjemněji zní zkreslení třetí harmonickou – projevuje se při velmi malých hlasitostech, a tak není ani maskováno signálem. Vznik zkreslení je nežádoucí, i když u elektronkových zesilovačů to jednoznačně říci nelze, zde se pohybují zkreslení okolo 5%, složitější zapojení dosahují hodnot kolem 1%, ale poslechově mohou být paradoxně horší než jednodušší klasická zapojení. V jistých speciálních případech je zkreslení dokonce vyžadováno - např. kytarové (nástrojové) zesilovače, lze se setkat dokonce možnostmi zkreslení regulovat např. řízením žhavení vstupních lamp. Rozlišujeme tedy pojmy věrná reprodukce a reprodukce, která se nám subjektivně líbí. Tranzistorové zesilovače běžně dosahují hodnot menších než 0.05 %, zatímco reproduktory se zkreslením pod 2% je velký problém vyrobit. Údaj o zkreslení reproduktorů ale najdete pouze u špičkových výrobků, např. profesionální reproduktory BEYMA mají udané hodnoty kolem 3%. [7]

5.6 *Intermodulační zkreslení TID*

Je opět způsobeno nelinearitou převodních charakteristik. Přivedeme li na vstup zesilovače dva sinusové signály o frekvencích f_1 a f_2 objeví se na výstupu zesilovače kromě těchto sinusových signálů ještě jejich kombinace f_1+f_2 , f_1-f_2 , $2f_1+f_1$, $2f_1+2f_2$, atd. Bylo definováno několik standardních kombinací dvou signálů používaných pro měření. Jde o signály vzdálené (např. 700 Hz + 10000 Hz) i blízké (např. 13000 Hz + 14000 Hz). Vyjadřuje se nejčastěji činitelem intermodulačního zkreslení TID. Vyhodnocení se nejčastěji provádí pomocí speciálních přístrojů (Audio Precision) nebo pomocí spektrálních analyzátorů. Opět není u moderních tranzistorových zesilovačů problém dosáhnout hodnot menších než 0,01%. [9]

5.7 *Gramofonový zvuk*

Hodně věcí se totiž nedá vysvětlit a přesto je vnímáme. Někteří lidé si lámou hlavu nad tím, proč jim ten zvuk z gramofonu daleko víc chutná. A neměl jsem na to jednoznačnou

a přesvědčivou odpověď. I když vlastní CD přehrávače velmi slušné a kvalitní, i tak je skoro přestali používat. Až později jsem narazil v literatuře na možné vysvětlení.

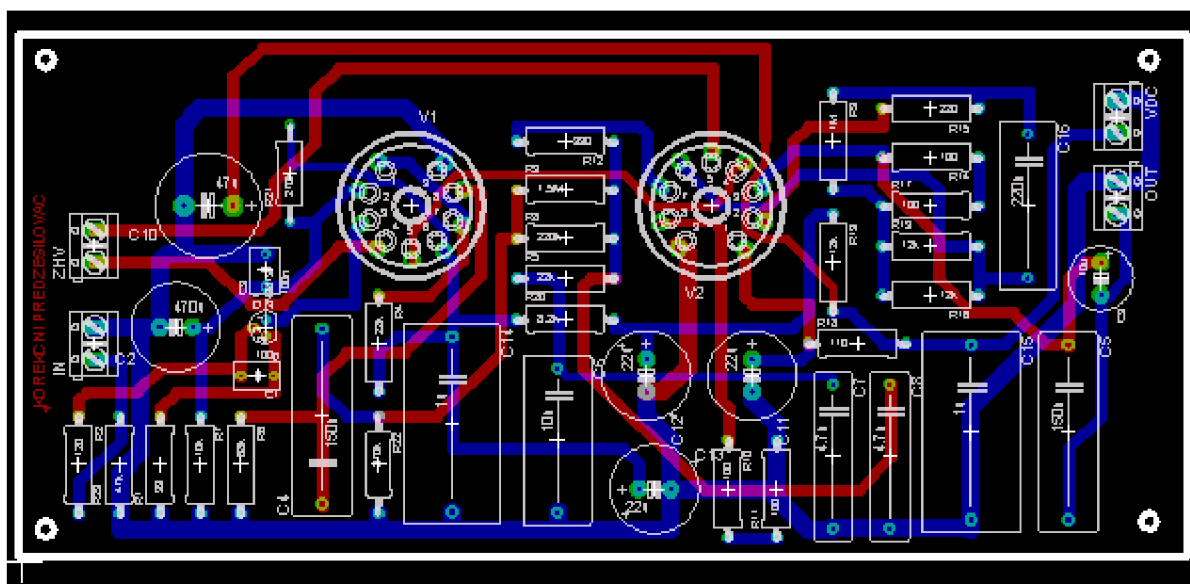
Oním vysvětlením budou zvuky v oblasti frekvence nad 20 kHz, které vůbec neslyšíme. A přesto na nás tyto vysoké frekvence mají vliv. Tam, kde končí s frekvencemi Audio CD přehrávače, SACD a gramofony s dobrou přenoskou pokračují a servírují rozmlsaným „ouškám“ klidně až do 50kHz. Problematikou vnímání vysokých frekvencí u lidí se zabývali neurologové deseti japonských univerzit a výzkumných ústavů. Své poznatky publikovali. Studie dokázala, že zvuky obsahující vysokofrekvenční složky významně ovlivňují mozkovou aktivitu posluchačů. Nikdo z testovaných posluchačů neslyšel zvuk nad 22kHz, nicméně záznam elektrické aktivity a krevního toku mozku statisticky dokázal vnímavost těchto vyšších frekvencí. Psychologická vyšetření ukázala, že zvuk obsahující kompletní frekvenční pásmo společně s pásmem nad 20kHz vyvolává u posluchačů příjemnější pocity než stejný zvuk bez horního pásma. Je známo, že drážka LP desky obsahuje až 150kHz a přenosky jsou schopny tyto frekvence snímat. Dalším výzkumem bylo zjištěno, že odfiltrováním vysokých frekvencí u některých hudebních nástrojů mění nástroj zabarvení zvuku. Měření dokázala, že alespoň jeden člen každé nástrojové skupiny vyzařuje zvuk s velkou energií i nad 40kHz, některé nástroje dosahují až nad 100kHz. Například trubka má harmonické až do 80kHz, housle a hoboje nad 40kHz a přitom 40% jeho akustické energie vzniká až nad 20kHz. Toto tedy jsou pádné důkazy o tom, že analog hraje lépe než CD i když to nedokážeme pořádně vysvětlit. [2]

Nyní Vám nestojí nic v cestě gramofon časem zkusit. A nebál bych se klidně začít nějakým starším z bazaru. Ony totiž i naše staré Tesly z let minulého režimu nehrály špatně. Ba naopak. A cena v bazarech bývá přijatelná pro každou peněženku. Přeji všem, kteří gramofon vyzkouší aby nelitovali a vychutnávali plnými doušky.

7 Vytvoření desky plošného spoje v programu Eagle

7.1 Vytvoření korekčního předzesilovače

Zapojení korekčního předzesilovače patří mezi poměrně složitější a rozsáhlejší zapojení. Při návrhu musíme navrhnout prostor okolo elektroněk vyzařujících teplo, které škodí hlavně kondenzátorům. Uvažujeme rozmístění součástek, nesmí být blízko u sebe, vhodné rozmístění na desce, potřeba co nejkratších spojů, ale musí se nám také zapojení vzhledově líbit. Při tvorbě země bych doporučil jednu rovnou tlustou zem, ale v Eaglu je to většinou problém, neboť program si propojení součástek navrhne sám (přechod ze schematic do board) podle námi vytvořeného schématu. Vše je samozřejmě elektricky správně zapojené. Na úkor rovné země budeme mít při složitějším zapojení delší spoje na desce. Samozřejmě u jednoduchého zapojení není složité vymyslet spojení, které bude našim požadavkům vyhovovat. Navrhne kompromis – zem bude docela rovná a součástky s co nejkratšími spoji. Doporučil bych se vyvarovat zemních smyček. Korekční předzesilovač je vyrobený s prokovy, je to vhodnější pro pájení, pro školu sice nákladnější, výroba zabere více času. Patice pro elektronky jsou ve skutečnosti větší než v knihovně Eaglu, proto se museli upravit na správnou velikost. V zapojení jsem použil elektronky ECC88 od výrobce SOVTEK. Původně bylo v plánu zapojit elektronky od firmy JJ Electronics, ale byly problémy s dodáním zboží.



Obr. 19. Deska korekčního předzesilovače vytvořená v programu Eagle



Obr. 20. Foto osazeného korekčního pravého kanálu



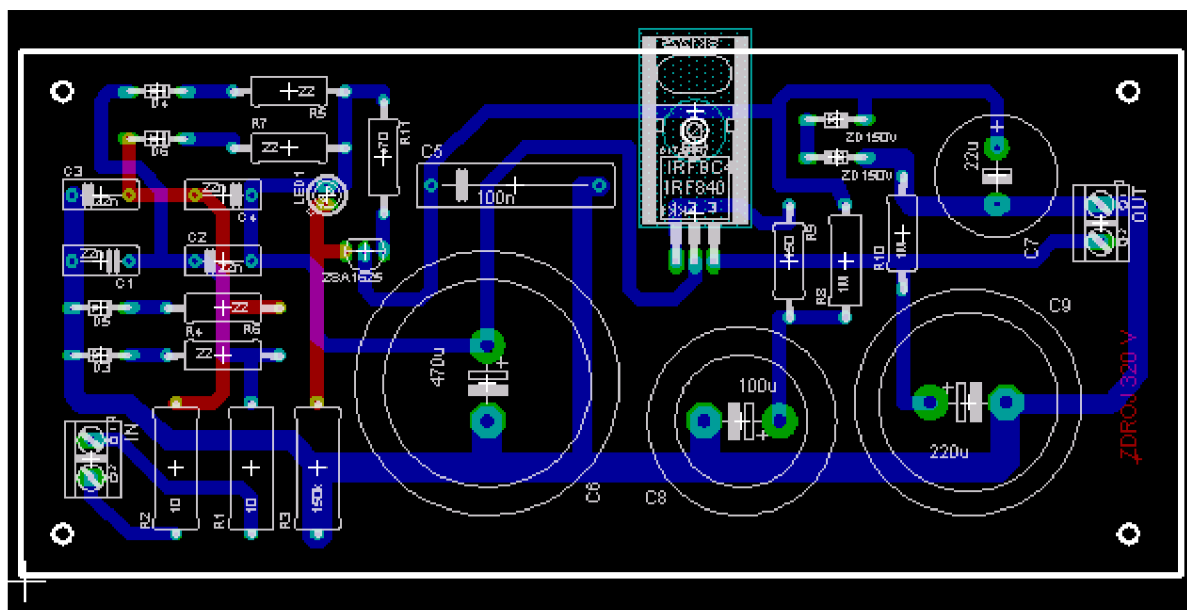
Obr. 21. Foto osazeného korekčního předzesilovače levého kanálu

7.2 Vytvoření zdroje anodového napětí

Napětí měřené mezi anodou a potenciálem katody (zemí) se pohybuje v řádu stovek voltů při anodovém proudu řádu jednotek mA (triody) až desítek mA (výkonové pentody). Pokud není použit elektronkový usměrňovač (EZ80, EZ81...), který zajistí postupný nárůst anodového napětí, je žádoucí aktivovat nejprve žhavicí napětí a teprve po nažhavení elektronek s časovým odstupem přivést anodové napětí (STANDBY), buď samostatným spínačem, nebo časovačem. Vyznavači opravdu „vysoké věrnosti“ – hifi používají ve svých zapojeních pouze elektrony, i na pozici usměrňovačů a žádné polovodičové součástky, včetně LED k indikaci provozu zařízení. Na jejich pozicích používají doutnavky, nebo

žárovky. I „case“ jejich přístrojů jsou z přírodních materiálů – dřeva. Zkrátka tak, jak to dělali konstruktéři ve vrcholné éře elektroniky tj. v šedesátých letech minulého století. [10]

V zapojení je jako stabilizátor napětí použit výkonový tranzistor MOSFET. Toto zapojení umožňuje poměrně kvalitně vyhladit napájecí napětí kondenzátory zapojené do řídicí elektrody regulačního Mosfet tranzistoru. Gretzův můstek s rezistory R1 – R4 zapojené v sérii s diodami usměrňovače uměle zvyšují dynamický odpor diod. Zvětšením dynamického odporu diod se zmenší úroveň a strmost impulsu vnikajících při spínání a vypínání diod a tím se zlepší možnost tyto impulsy následně odfiltrovat. Výstupní napětí je dáno zenerovými diodami zapojené v kolektoru tranzistoru IRFB40.



Obr. 22. Deska zdroje anodového napětí vytvořená v programu Eagle



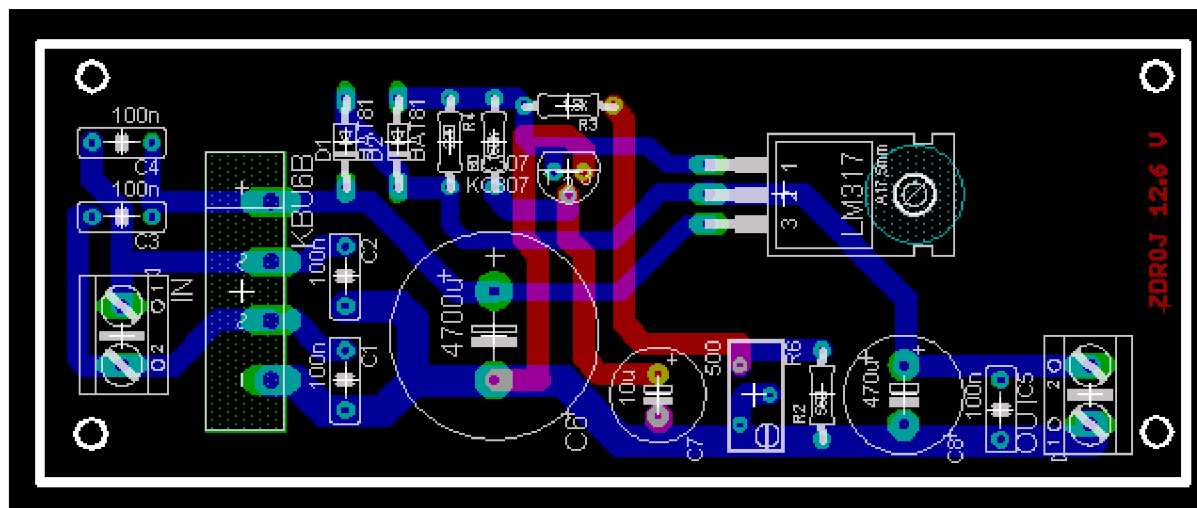
Obr. 23. Foto osazeného zdroje anodového napětí

7.3 Vytvoření zdroje žhavení

V současné době se používají prakticky elektronky se žhavicím napětím buď 6,3 voltu, nebo 12,6 voltu v závislosti na konstrukci žhavicích systémů. V mém zapojení používám napětí 6,3 V pro elektronky ECC88. Koncové elektronky (pentody – EL84, EL34 apod.) a sdružené elektronky (trioda – pentoda, ECL82, ECL86 apod.) používají žhavicí napětí 6,3 voltu. U triod s vyvedeným středem žhavicího vinutí (ECC81, ECC82, ECC83...) je možné použít žhavicí napětí jak 6,3 V (piny 4+5 – 9), tak 12,6 V (piny 4 – 5). U některých triod (vysokofrekvenčních, ECC85, ECC88...) ale jen napětí 6,3 V na piny 4 a 5. Pin 9 je stínění. Obě tyto skupiny mezi sebou nelze bez úprav napájení zaměňovat. [10]

V některých zapojeních, hlavně s více elektronkami, lze s výhodou využít žhavicího napětí 12,6 V při polovičním žhavicím proudu oproti zapojení s napětím 6,3 V (menší nároky na „tvrdost“ zdroje). Existují i zapojení kdy byla v sérii zapojena žhavicí vinutí dvou koncových pentod EL34 a v tomto zapojení použito žhavicí napětí 12,6 V (elektronkový zesilovač JADIS). Výhodnější je použít paralelní zapojení pentod na napětí 6,3 V (přece jen představuje žhavicí vinutí jistý odpor a možný úbytek napětí). Proudové nároky na zdroj žhavicího napětí jsou poměrně dost velké. Zatímco většina dvojitých triod vyžaduje při žhavicím napětí proud kolem 300 mA, u koncových pentod už je to cca 800 mA (EL84) až 1,5 A ! (EL34). To samozřejmě vyžaduje dostatečné dimenzování napájecího transformátoru, posléze i usměrňovacích diod a stabilizátoru napětí. [10]

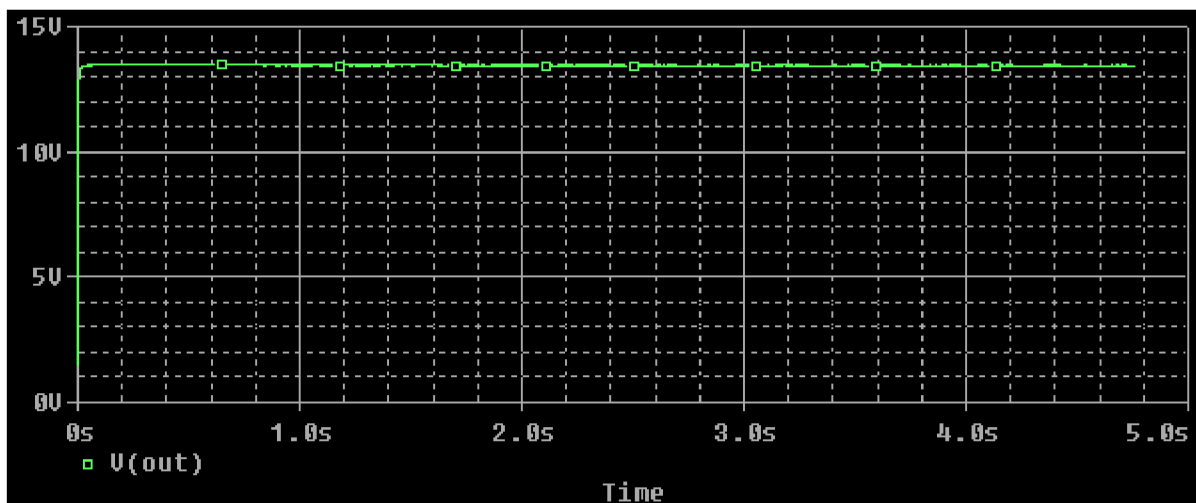
Žhavicí napětí je možné použít střídavé (používané hlavně v historických zapojeních) i stejnosměrné (prakticky ve všech nových – současných zapojeních). Usměrnění, filtrace a stabilizace napětí snižuje síťový brum. Kolísání žhavicího napětí by mělo být maximálně v rozmezí $\pm 5\%$ napětí zdroje tj. hodnoty žhavicího napětí je velmi vhodné v daných rozmezích dodržet. Při překročení těchto hodnot dochází ke zkrácení životnosti elektronek. Podžhavení sebou zase nese snížení teploty katody a snížení její emisní schopnosti. Použil jsem klasické zapojení monolitického nastavitelného stabilizátoru napětí.



Obr. 24. Deska zdroje žhavení vytvořená v programu Eagle



Obr. 25. Foto osazeného zdroje žhavení



Obr. 26. Ukázka simulace zdroje žhavení v programu PSpice

8 Výsledky měření, srovnání

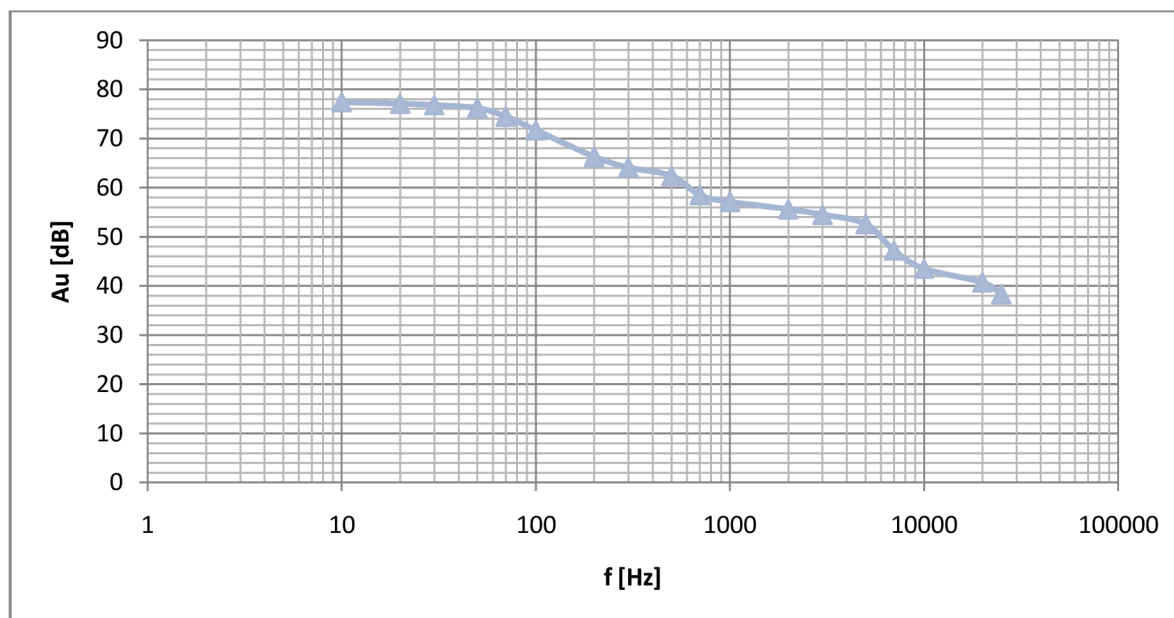
Změřené parametry

- Na frekvenci 1 kHz je celkové zesílení předzesilovače 57 dB
- Rozsah 10 Hz – 25 kHz s odchylkou ± 1 dB
- Velké zesílení – použití na vložku MC
- Zesílení z 0.5 mV na 360 mV (na výstupu)
- Maximální výstupní úroveň napětí je při frekvenci 100 Hz a 1 kHz větší jak 100 V, na frekvenci 10 kHz je větší jak 25 V (omezení vstupu)
- Minimální zatěžovací impedance na výstupu 25 k Ω
- Zesílení 700x
- THD+N zkreslení 0.6%
- Vstupní odpor 47 k Ω

Zhotovení grafu

f [Hz]	10	20	30	50	70	100	200	300	500
Au [dB]	77,4	77,1	76,8	76,2	74,5	71,7	66,3	64,1	62,4
f [Hz]	700	1k	2k	3k	5k	7k	10k	20k	25k
Au [dB]	58,5	57,1	55,6	54,5	52,6	47,2	43,5	40,7	38,3

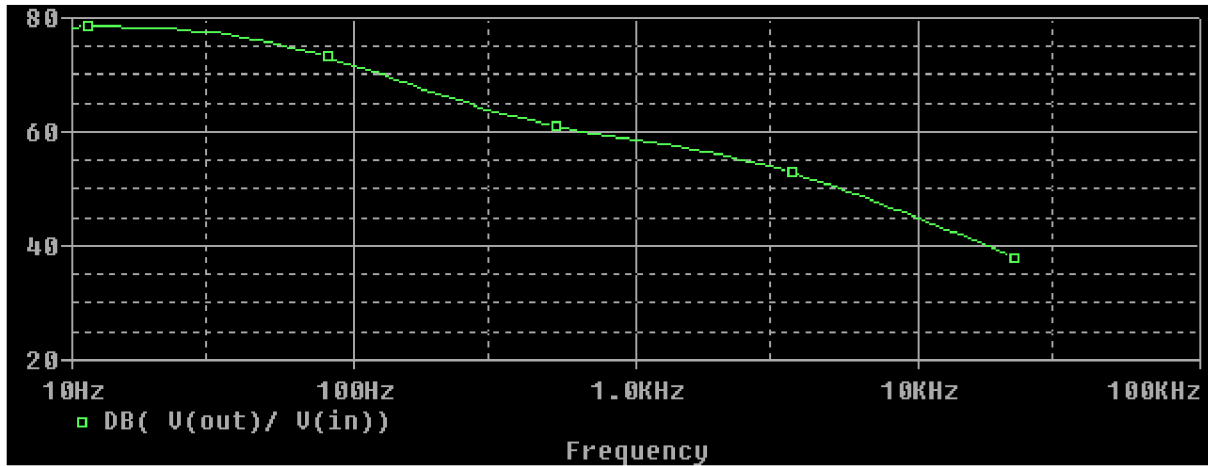
Tab. 6. Naměřené hodnoty kmitočtové charakteristiky



Obr. 27. Naměřená kmitočtová charakteristika RIAA korekčního předzesilovače

Srovnání charakteristiky

Změřená charakteristika RIAA odpovídá charakteristice simulované v programu PSpice, jen je mírně posunuta vlivem vstupního napětí. Zde uvádím pro přehlednost již zmíněnou simulovanou charakteristiku.



Obr. 28. Simulace korekčního předzesilovače s elektronkami v programu PSpice

9 Ukázky moderních gramofonů



Obr. 29. Moderní gramofony

10 Závěr

V této práci jsem nastínil problematiku elektronek a korekčních předzesilovačů. Ukázal jsem, že elektronky stále existují a jsou součástí vysoce kvalitních HIGH – TECH zařízení, které stojí nemalé peníze.

V úvodu jsem popsal typy, funkci a značky elektronek. Významnou firmou v našem okolí zabývající se výrobou elektronek je firma JJ Electronics, která sídlí na Slovensku. Velmi pěkně a kvalitní výrobky má také firma PROJECT. Tato firma vyrábí i zajímavé zapojení, např. korekční předzesilovače a gramofony. Zdokonaluje se i výroba přenosků, přenosky se dělí na typy MM a MC. Mé zapojení je sestaveno na typ MM, mohlo by fungovat i na typ MC, stačilo by jen přidat na vstup přepínatelné rezistory a kapacitou. Dále je zde popsána záznamová charakteristika desek. Pro gramofony je nejvhodnější korekční předzesilovač zapojený s elektronekami, neboť elektronky mají kvalitnější zvuk. Korekce jsou pasivní, aktivní, popř. je kompromis mezi nimi. Uvedené zapojení obsahuje pasivní korekci.

Hlavním cílem této práce bylo popsat korekční předzesilovač, navrhnout a realizovat desku plošných spojů pomocí programu Eagle. Součástí práce je i navrhnutí a realizace desky zdroje anodového napětí a zdroje žhavení. Předzesilovač jsem realizoval a provedl základní měření jeho parametrů, výsledky jsem porovnal se simulací ze semestrálního projektu v programu PSpice. Všechny zhotovené zapojení jsem vyfotil a zobrazil v této práci.

Důležitou částí této práce je i srovnání elektronek a polovodičů. Zde jsou popsány nevýhody polovodičových zapojení, různé zkreslení. Zajímavostí jsou moderní operační zesilovače řady LME firmy National Semikonduktor, které se blíží některými parametry (přebuditelnost) elektronekám, neboť mohou být napájeny napětím ± 22 V, mohou se chlubit také malým zkreslením.

Měření parametrů předzesilovače je srovnatelné se simulací v programu PSpice, zapojení jsem vyzkoušel připojit na kvalitní gramofon a hrálo opravdu kvalitně.

11 Seznam použité literatury a jiných zdrojů

[1]

VLACH, J., VLACHOVÁ, V. Lampárna - aneb Co to zkusit s elektronkami? Praha: BEN - technická literatura, 2004.

[2]

Vinylové námluvy: Základy gramofonologie, 2007. Dostupné na [www: http://www.f-sport.cz/hifinazory/stranky/gramofon.php](http://www.f-sport.cz/hifinazory/stranky/gramofon.php).

[3]

Amatérské radio, Praha: MAGNET – časopis pro elektroniku a amatérské vysílání, 1978.

[4]

Předzesilovač pro gramofon, 2000. Dostupné na [www: http://www.belza.cz/audio/phono.htm](http://www.belza.cz/audio/phono.htm).

[5]

Amatérské radio A 6 a 9, Praha: AMARO – časopisy pro elektroniky a radioamatéry, 2008.

[6]

Amatérské radio A 4, Praha: AMARO – časopisy pro elektroniky a radioamatéry, 2007

[7] SEDLÁK, J., Zkreslení II - definice zkreslení, 2002. Dostupné na [www: http://www.zesilovace.cz/](http://www.zesilovace.cz/).

[8]

Muzikus: Komunitní hudební portál, 2003. Dostupné na [www: http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Kytarove-zkresleni-nic-jednodussiho](http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Kytarove-zkresleni-nic-jednodussiho).

[9]

Zesilovače – vlastnosti a parametry, 2008. Dostupné na [www: http://www.audioweb.cz/tp-zesilovace2.htm](http://www.audioweb.cz/tp-zesilovace2.htm).

[10]

Elektronky, trocha teorie I, 2005-2009. Dostupné na [www: http://engel.ic.cz/tubes_soubory/Page423.htm/](http://engel.ic.cz/tubes_soubory/Page423.htm/).

[11]

Hrabovský Miroslav, Juránek Antonín, EAGLE pro začátečníky. Praha: BEN - technická literatura, 2007.