

V TOMTO SEŠITĚ

Z dějin vědy a techniky 1

AMATÉRSKÁ HUDEBNÍ ELEKTRONIKA

Co lze doma vyrobit 3

Nízkofrekvenční zesilovače 4

Elektrické řešení zesilovačů 5

Praktická stavba předzesilovačů 25

Předzesilovač s 2x ECC83 25

Předzesilovač s 2x ECC83 a ECC82 29

Předzesilovač s 2x ECC83 a IO 31

Koncové zesilovače 32

Modul koncového zesilovače

LEACH AMP 200 W/4 Ω 33

Napájecí zdroj pro zesilovače 37

Nástrojový zesilovač 200 W/4 Ω 39

KONSTRUKČNÍ ELEKTRONIKA A RADIO

Vydavatel: AMARO spol. s r. o.

Redakce: Radlická 2, 150 00 Praha 5, tel.: 2 57 31 73 11, tel./fax: 2 57 31 73 10.

Šéfredaktor ing. Josef Kellner, sekretářka redakce Eva Kelárková, tel. 2 57 31 73 14.

Ročně vychází 6 čísel. Cena výtisku 36 Kč.

Rozšiřuje PNS a. s., Transpress spol. s r. o., Mediaprint & Kapa a soukromí distributoři.

Předplatné v ČR zajišťuje **Amaro** spol. s r. o. - Michaela Jiráčková, Hana Merglová (Radlická 2, 150 00 Praha 5, tel./fax: 2 57 31 73 13, 2 57 31 73 12. Distribuci pro předplatitele také provádí v zastoupení vydavatele společnost Media-servis s. r. o., Abocentrum, Moravské náměstí 12D, P. O. BOX 351, 659 51 Brno, tel: 5 4123 3232; fax: 5 4161 6160; abocentrum@mediaservis.cz; reklama - tel.: 800-171 181.

Objednávky a předplatné v Slovenskej republike vybavuje MAGNET-PRESS Slovakia s. r. o., Teslova 12, P. O. BOX 169, 830 00 Bratislava 3, tel./fax: (02) 44 45 45 59, (02) 44 45 06 97 - předplatné, (02) 44 45 46 28 - administrativa, email: magnet@press.sk

Podávání novinových zásilek povoleno Českou poštou - ředitelstvím OZ Praha (č.j. nov 6005/96 ze dne 9. 1. 1996).

Inzerce v ČR přijímá redakce, Radlická 2, 150 00 Praha 5, tel.: 2 57 31 73 11, tel./fax: 2 57 31 73 10.

Inzerce v SR vyřizuje MAGNET-PRESS Slovakia s. r. o., Teslova 12, 821 02 Bratislava, tel./fax: (02) 44 45 06 93.

Za původnost a správnost příspěvků odpovídá autor (platí i pro inzerci). Nevyžádané rukopisy nevracíme.

<http://www.aradio.cz>; E-mail: pe@aradio.cz

ISSN 1211-3557, MKČR 7443

© AMARO spol. s r. o.

Z dějin vědy a techniky

Historie elektřiny a magnetizmu

Kvantová mechanika

Svět kvantové mechaniky otevřel mladým generacím pohled na děje, o kterých se v první polovině minulého století prakticky nemluvilo, a u nás nebyla do roku 1960 tato teorie ani přednášena na fakultě elektrotechniky. Nebylo divu, nepřicházela „z východu“. První osvětu přinesly až kurzy pořádané ČSAV ve spolupráci s ČVUT od roku 1963.

Fyzik Erwin Schrödinger obdržel roku 1933 spolu s Paulem Diracem Nobelovu cenu za svou teorii vlnové mechaniky, což je jedna z částí, nebo můžeme říci aplikace, kvantové mechaniky. Je to základ veškeré moderní nauky o přírodních vědách, a disciplína, která dodnes vzrušuje vědce, pracující v tomto oboru. Je třeba si uvědomit, že bez platnosti a postupného objevování zákonů kvantové mechaniky bychom neznali laser, polovodiče, supravodiče, molekulární biologii, tranzistorová rádia, digitální hodiny, mikropočítače a desítky dalších dnes zcela běžných výrobků. Také základy nauky o radioaktivním rozpadu nebo naše znalosti o dějích na Slunci by byly zahaleny temnotou.

V klasické mechanice má každé těleso či částice své určené místo. Ale ve světě malých částic takový předpoklad neplatí, ty se řídí teorií pravděpodobnosti.

Chování a vlastnosti mikrofyzikálních systémů popisuje právě kvantová mechanika. Podle ní má částice, např. elektron, nejen „hmotné“ vlastnosti (energií), ale také vlnové vlastnosti (kmitočet) a projevuje se hmotným vlněním. Částice se mohou v jednom okamžiku vyskytovat na více místech a Schrödingerovy vlnové funkce popisují pravděpodobnosti jejich výskytu na definovaném místě. Právě tento fenomén nemožnosti přesné lokalizace osvětluje, že nelze přesně definovat jediné náhodné místo, kde se určená částice právě nachází. Je to svět, kde musíme brát v úvahu všechny existující možnosti a na základě pozorování pak vybrat variantu, která je nejbližší realitě.

Podle zákonů kvantové mechaniky se ale ukazuje, že také velké částice mohou být ve více stavech, stejně jako že se nikdy do některého stavu nedostanou. Schrödinger byl sám tímto poznatkem velmi zneklidněn a nazval tento paradox Schrödingerovou kočkou. Podle něj může být kočka v jednom okamžiku mrtvá i živoucí a přechází z jednoho do druhého stavu, jestliže ji někdo pozoruje.

Jak vidíte, ve světě kvant neexistuje žádná jednoduchá skutečnost - je mnoho různých realit, z nichž žádná není více či méně reálná než ta, která je pro nás zjevná. Zneklidněn nebyl pouze Schrödinger. Albert Einstein, který odmítal uznat nepředvídatelné děje podle zákonů kvantové mechaniky, prohlásil, že „Bůh nehraje v kostky“. Niels Bohr, který nám sice představil model atomu, ale podle dnešních poznatků nepřesně (podrobněji byl osvětlen až pomocí teorie kvantové mechaniky), prohlásil, že kdo se nezděsil kvantové teorie, ten ji nepochopil.

Tunelový efekt

Jeden z fascinujících fenoménů kvantové mechaniky je tunelový efekt, nevysvětlitelný poznatky klasické fyziky. Nějaká částice, kupříkladu elektron, pohybující se těsně u překážky ve formě energetické nebo materiálové bariéry, tuto bariéru s malou, ale konečnou pravděpodobností překoná, ačkoliv jeho kinetická energie tomu neodpovídá. Aby překonal bariéru, prostě ji „proleze“ jako tunelem. A aby byla senzace ještě větší, pohybující se elektron přitom překonává rychlost světla, takže musí tunel opustit ještě předtím, než do něj vstoupil. Pro daný krátký časový interval se nám to jeví, jako že existují dva totožné elektrony - každý na jedné straně tunelu!

Tento poznatek však ale musíme korigovat, protože při zjevení se druhého elektronu na východu z tunelu vzniká třetí z antihmoty, ten se vrací zpět do tunelu, aby konečně splýnul na jeho vstupu s prvním elektronem. Jestliže připustíme tuto představu, existuje v každém okamžiku pouze jeden elektron, který se nenadále objeví na druhé straně tunelu, aniž by měl zřejmé předpoklady proniknout skrz. Každopádně se ukazuje, že po svém průchodu tunelem získává negativní kinetickou energii, která se jinak rovná té, kterou měl před průchodem.

Podle Einsteinovy teorie relativity je překročení rychlosti světla nemožné. Pokud by to možné bylo, mohli bychom např. přijímat rádiové signály ještě před tím, než byly vyslané. Mohli bychom uvidět, co se stane v budoucnu. Experimentální výsledky samotné při tunelovém efektu se zřetelně na překročení rychlosti světla nejsou sporné, avšak jejich interpretace ano. Vždyť i v souladu s teorií relativity např. fázová nebo skupinová rychlost překračuje rychlost světla přesto, že rychlost přenosu sig-

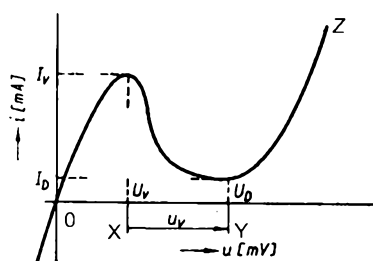
nálu (jeho první výskyt) je vždy o něco pomalejší než je rychlost světla, a nikdy nebylo naměřeno, že čelo vlny je rychlejší než rychlost světla. Teorie relativity tedy nebude ani existenci tunelového efektu vyvrácena.

Objev Leo Esakiho

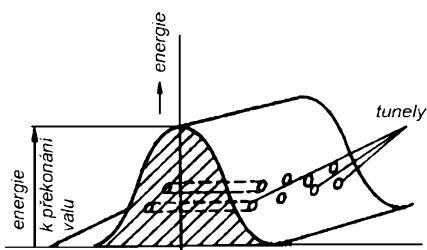
Vše, co zde bylo dosud řečeno, se zdá být neskutečné a spíše připomíná science fiction. Přesto se můžeme přesvědčit, že existuje polovodičová součástka, která je principiálně založena na tunelovém efektu. Byl to v roce 1957 japonský vědec Leo Esaki, který v laboratořích Sony Research sestavil součástku, využívající tento efekt, a učinil tak významný objev, za který získal později v roce 1973, ještě se dvěma dalšími kolegy, Nobelovu cenu.

Tunelová, někdy nazývaná Esakiho dioda, je z hlediska technologie vyrobena ze silně dotovaných materiálů P a N s velmi tenkou hradlovou vrstvou, jejíž tloušťka je řádu 0,01 μm . Prakticky nevykazuje žádný usměrňovací efekt a přechodem prochází proud v obou směrech (propustném i závěrném) již při napětí několika desetin voltu. Charakteristika v propustném směru připomíná tetrodu - její část má záporný diferenční odpor. Takový typický průběh vidíme na obr. 1. Stejněsměrný odpor má stále kladnou hodnotu, takže při každém kladném napětí absorbuje dioda určitý výkon, ovšem diferenční odpor je v mezích 0-x a y-z kladný, zatím co v rozsahu x-y vykazuje zápornou velikost (tj. při malém zvýšení napětí poklesne průchozí proud). Toho lze využít v zesilovačích, oscilátorech popř. spínacích prvcích a čítačích, a to na velmi vysokých kmitočtech (až řádu GHz), neboť tunelový efekt je extrémně rychlý.

Pro první přiblížení si můžeme děje probíhající v tunelové diodě představit tak, jak je znázorněno na obr. 2. Při malém zvětšení napětí (energie) do oblasti mezi



Obr. 1. Voltampérová charakteristika tunelové diody



Obr. 2. Znázornění průchozích tunelů na přechodu (potenciálním valu)

U_v a U_0 (podle obr. 1) se elektrony dostávají do oblasti tunelů a procházejí jimi. Jakmile se ale napětí zvětší nad hodnotu U_0 , elektrony se dostanou nad oblast tunelů a přes přechod již pronikat nemohou, a prvek se dále chová jako běžná dioda. Přesnější fyzikální vysvětlení lze podat pomocí Fermiho hladiny a úrovní vodivostního a valenčního pásu, ale pro naši představu je předchozí vysvětlení dostačující.

Zcela zvláštní postavení má tzv. inverzní dioda, což je tunelová dioda s nepříliš významnou oblastí záporného diferenčního odporu, ale přes kterou proud v závěrném směru prochází při nižším napětí než v propustném směru. Tento prvek však nedoznal velkého rozšíření.

Postupně se technologie výroby tunelových diod dostala na kvalitativně vysokou úroveň, takže bylo možné využívat těchto moderních prvků i prakticky. Dnes známe i výkonové součástky na principu tunelové diody - Gunnovy diody.

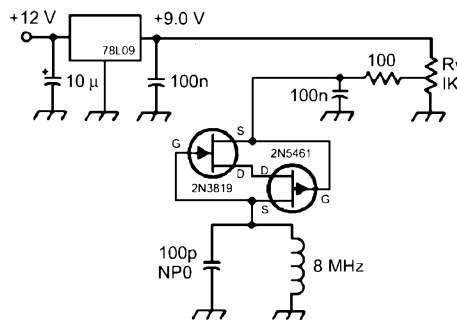
Firma Heathkit již v 60. letech vyrobila GDO s tunelovou diodou jako oscilátorem. Vůbec využití v oscilátorech je časté, a problémy dělá pouze širokospektrální šum, který je třeba vhodným způsobem ošetřit.

Oscilátory na principu negativního odporu (NRO)

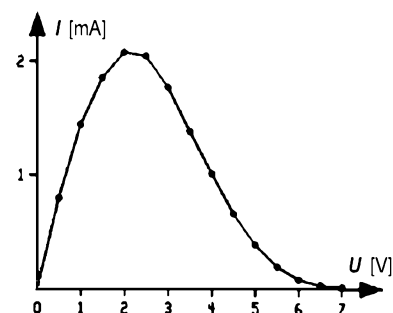
Negativní diferenční odpor můžeme zjistit i při vhodném uspořádání klasických zesilovacích prvků, jakými jsou např. tranzistory FET, což principiálně znázorňuje zapojení na obr. 3, které původně publikoval v roce 1980 G3MYM v časopise „The Short Wave Magazine“, a tuto kombinaci tranzistorů FET nazval lambdadioda.

Na obr. 3 je však verze, kterou navrhl DJ5IL a popsal v časopise FUNK. Pro kmitočet 8 MHz má cívka v rezonančním obvodu 30 závitů měděným lakovaným drátem na jádře Amidon T50-6. Oscilátor se vyznačuje extrémně malou spotřebou proudu, a proto je minimálně teplotně závislý. Zapojení na tomto principu proto můžeme využít k sestavení jednoduchých a přesto kmitočtově stabilních oscilátorů pro vysoké kmitočty.

G3MYM popsal funkci lambdadiody následovně: elektrody G a S obou tranzistorů FET jsou zapojeny paralelně k provoznímu napětí, ale jejich kanály jsou zapojeny v sérii, takže oběma tranzistory musí procházet stejný proud. Když začneme zvětšovat provozní napětí od nuly, jsou zprvu oba tranzistory otevřené a proud kanály D-S vzrůstá. Při větším napětí se uplatní vliv řídicích elektrod, kterými se tranzistory začínou zavírat. Při dalším zvětšování provozního napětí procházející proud klesá (negativní odpor) až zcela zanikne - viz obr. 4. Maximální proud procházející lambdadiodou je 2,1 mA, pak začíná oblast negativního odporu, a ještě při 7 V má proud velikost asi 400 nA. Z cha-



Obr. 3. Principiální zapojení oscilátoru využívajícího negativního odporu dvou tranzistorů FET



Obr. 4. Voltampérová charakteristika dvojice tranzistorů FET zapojených podle obr. 3

rakteristiky na obr. 4 je zřejmé, proč tato kombinace tranzistorů FET dostala název po řeckém písmenu lambda - její tvar toto písmeno připomíná.

V oscilátoru na obr. 3 je dvojice tranzistorů 2N3819/2N5461 kmitočtově velmi stabilní, cívka má při $Q = 250$ ztrátový odpor asi 30 k Ω , zatímco statický odpor lambdadiody je při oscilacích a vyšším napětí asi 8 V (nastaveným trimrem R_v) řádu M Ω , takže jeho změny jsou zanedbatelné.

Na stabilitu takového oscilátoru mají v první řadě vliv provozní ztráty. Čím vyšší bude kvalita rezonančního obvodu, tím méně tepla se bude rozptylovat. Z toho plyne, že Q obvodu by mělo být co největší, a oddělovací zesilovač, navázaný za oscilátor, by měl mít velký vstupní odpor.

Na rozdíl od tunelové diody se při zvyšování napětí blíží procházející proud nule a zesílení jedné. Ztráty tedy budou nejmenší a kmitočtová stabilita největší v oblasti nejmenších proudů, tj. při větším provozním napětí. A nejen to - současně klesá i podíl vyšších harmonických.

Literatura

- [1] Fischer, K.: Quantenmechanik, Tunneleffekt und ein NRO. FUNK 1/2003.
- [2] Přednášky postgrad. kurzu kvantové radiotechniky 1963 až 1964, ČSAV-ÚŘE.
- [3] Stránský, J. a kol.: Polovodičová technika I. SNTL-ALFA, Praha 1976.
- [4] Dirac, P. A. M.: Lekci po kvantové mechanice. Mir, Moskva 1968.
- [5] Heisenberg, W.; Schrödinger, E.; Dirac, P. A. M.: Die Moderne Atomtheorie. Leipzig 1934.
- [6] Davies, P.: O čase. Motýl, Bratislava 1999.
- [7] Korsunskij, M. I.: Atomové jádro. SNTL, Praha 1954.

QX

AMATÉRSKÁ HUDEBNÍ ELEKTRONIKA

Vojtěch Voráček, OK1XVV

Slibuji - pro realizaci a oživení zapojení uvedených v tomto čísle nebude potřeba počítač ani logický analyzátor, schémata nebudou obsahovat ani žádný mikroprocesor, ostatních integrovaných obvodů jen minimum. Naopak, vrátíme se k elektronkám, a někteří také k pilce, vrtačce, pilníku. Výsledkem konstrukcí nebude jen osazená deska s plošnými spoji, ale funkční a hrající výrobek, pro někoho z řad hudebně nadaných možná i užitečný.

Jedním motivem pro napsání tohoto čísla Praktické elektroniky byl tak trochu smutný pohled na okolní mládež, která tráví od šesti let nebo dříve mnoho hodin denně u počítače se spustěnými hrami bez jakékoliv polytechnické aktivity a snahy se zdokonalit v rukodělné činnosti (tedy mimo škrubání joystickem). V tomto sezení budou pokračovat patnáct let nebo i déle. Pokud se jim ale ulomí kabel, nebudou ho asi ani umět spravit.

Druhým motivem byla moje snaha pomoci pražské beatové hudební skupině Rychlá rota. Skupina dobrých hudebníků, které ale hudba neživí. Takže ani nechtějí vydávat peníze za profesionální vybavení nejvyšší třídy a spíše je investují do nástrojů.

Přesto vespolek během asi půl roku postavili docela slušně hrající hudební aparaturu, a to za zlomek ceny aparatury kupované. Samozřejmě, ne vše se dá vyrobit, ale i tak při stavbě svépomocí hodně ušetříte. Má to ale jednu podmiňku - musí vás to bavit.

Jednotlivé popsané výrobky, které vyšly z dílny mojí a Petra - kapelníka, hráče a současně technika kapely - byly v průběhu stavby „odladovány“ podle požadavků zkušených hudebníků tak, aby používaným nástrojům a zbytku aparatury dobře zvukově „seděly“ v případě nejčastěji hraného repertoáru a v akustickém prostředí sálů a klubů střední velikosti.

Co lze doma vyrobit

Ne vše z hudební elektroniky je pro stavbu svépomocí vhodné. Začnu od začátku.

Tak asi si doma nevyrobíme mikrofony. Nebylo by to ekonomické a cena spotřebních, ale přesto vyhovujících mikrofonů není dnes nikterak vysoká. Samozřejmě špičkové výrobky si cenu stále drží.

Také výroba mixážního pultu je dost problematická - ani ne tak po elektrické stránce - dobrých zapojení, která snesou i profesionální měřítka, bylo třeba

v PE a AR uveřejněno dost. Je to vlastně víceméně mechanické osazování stále stejných obvodů, převážně s operačními zesilovači. Ale raději si to předem spočítejme - kvalitní otočný potenciometr stojí kolem 50,- Kč, tahový ještě mnohem více. K tomu velké a drahé desky s dvoustannými plošnými spoji a prokovenými otvory, na nich nízkošumové operační zesilovače, knoflíky, kvalitní konektory XLR a „jack“ (kolem 100,- Kč/ks), a především to nejdražší a nejpracnější - mechanika. Taková, na kterou se dá koukat, bude stát jistě hodně, a dá hodně práce. A proto vzhledem k pracnosti mechanického provedení (pokud je někdo zručný mechanik) nebo ceně (pokud někdo zručný mechanik není a třeba pilování šestnácti stejných podélných otvorů pro tahové potenciometry při kusové výrobě ho vyloženě nebaví) se stavba mixážního pultu dnes určitě nevyplatí. Vždyť takové jednodušší pulty, vyráběné většinou v Asii, stojí dnes srovnatelně tolik, jako kdybychom sečetli jen cenu součástek mixážního pultu. Např. pult s 18 vstupy a veškerým komfortem, který může potřebovat tři až čtyř-

členná kapela, stojí kolem 13 000,- Kč, a to dokonce i s vyhovujícím vestavným efektovým procesorem (např. od firmy Behringer - viz obr. 1).

Ale jdeme po cestě signálu dál - za mixážním pultem následují zesilovače. Ty odjakživa byly a asi pořád budou jedním z amatérů nejčastěji stavěnými výrobky. A my amatéry jsme, proto čteme tenhle časopis a proto se v něm hlavně zesilovačům budu věnovat. Jejich amatérská stavba je docela snadná, je-li k dispozici dobrá a vyzkoušená zapojení. A chceme-li, aby zesilovač k něčemu vypadal, je to u něho mnohem snadnější, než u jiných výrobků - můžeme použít předmontované skříně „rack“, prodávané několika firmami (obráz. 2). A když se to moc mechanicky nepovede, nevádí - na koncertech bývá přišel. Pokud to bude zesilovač určený k připojení rovnou k nástroji, tak ho můžeme vestavět do reproduktorové skříně a vznikne tak „kombo“, ušetříme trochu na mechanice. Pokud to bude koncový zesilovač určený k ozvučení (PA), do kterého se bude pouštět už signál zpracovaný mixážním pultem, pak v případě, že použijeme profesio-



Obr. 1. Směšovací pult Behringer



Obr. 2. Skříň „rack“

nálně vyráběnou skříň, nikdo možná ani nepozná, že jde o výrobek amatérský. A ušetříme asi tak 60 % nákladů.

Zesilovač si tedy postavíme, to půjde, ale co reproduktorové soustavy? Pokud máme základní truhlářské vybavení a zručnost, není to nic složitého. Samozřejmě musíme dovnitř koupit reproduktory a postavit odpovídající výhybky. Zde ušetříme asi 50 % nákladů. Takže za cenu jedné „bedny“ pořídíme dvě.

V případě stavby reproduktorové skříně je dobré se raději držet osvědčených konstrukcí a materiálů. Zde experimentování bez příslušného měřicího

vybavení a bez trpělivosti, kterou modifikace skříní vyžadují, nemusí přinést optimální výsledky. Naštěstí výrobci reproduktorů vydávají pro své výrobky výkresy doporučených skříní spolu s předpokládanými parametry. Podle takového plánu lze postavit soustavu, která bude parametry srovnatelná s profesionálním výrobkem.

Nakonec uvedu několik zapojení jednoho poměrně neznámého hudebního nástroje. Je to theremin, jeden z mála elektronických hudebních nástrojů, u kterého je amatérská stavba reálná. Výsledek i zvuk bude jistě zajímavý.

Nízkofrekvenční zesilovače

Nf zesilovače patřily asi vždy k nevyhledávanějším výrobkům, vhodným pro amatérskou stavbu.

Vyrobít vyhovující nf zesilovač (nebo spíše osadit desky s plošnými spoji nf zesilovače, a to až již koncového, nebo jeho vstupní části) není celkem nic složitého.

Horší je to většinou s mechanickou částí konstrukce, dotáhnout ji tak, aby výrobek také trochu reprezentoval. Na-

skýtá se samozřejmě možnost vyrobit si skříň svépomocí celou - to znamená nastříhat nejlépe duralové panely, případně naohýbat hliníkové nebo ocelové šasi, nějak to vše mechanicky pospojovat, třeba distančními sloupky nebo úhelníky a „obalit“ to nějakým krytem. Je to práce zdoluhavá, a řekl bych, že skoro zbytečná. Navíc výsledek nemusí být vždy úměrný vynaložené námaze a prostředkům. Materiály jsou poměrně

drahé, obzvláště duralové plechy, nehledě na cenu práce.

Některé konstrukce popsané v tomto čísle však byly takto řešeny (obr. 3a, obr. 3b). Z ocelového plechu byl naohýbán základ skříně, opatřený otvory pro konektory, potenciometry atd., který byl doplněn duralovými bočnicemi pro zpevnění. Bočnice jsou případně využitelné i jako chladič pro menší výkony. Tato skříň byla nahore uzavřena víkem z ocelového plechu. Vše jsem nakonec nechal opatřit povrchem v práškové lakovně, odstín černá matná (nebo podle libosti). Výsledkem byla poměrně levná skříň, náklady na výrobu skříně o normalizovaných rozměrech dvou „rack“ modulů (šířka 19" a výška 89 mm) byly asi 700,- Kč. Ovšem výsledek nebyl úplně dokonalý - skříň není vzhledem k použitému tenkému ocelovému plechu (který je sice levný, ale při větší tloušťce zase poměrně těžký) dostatečně tuhá, navíc spodní kryt není u této konstrukce odnímatelný. A jelikož každý zesilovač zde uvedený je vlastně optimálně „doladěný“ a byl během zkoušek ještě mnohokrát upravován a přizpůsobován vkusu muzikantů, ocenil jsem v průběhu odlaďování raději snazší přístup k součástkám i ze spodní strany předzesilovačů. Proto je lepší mít odnímací i spodní panel.

V konstrukcích dokonalejších zesilovačů jsem dal raději přednost sice dražšímu, ale elegantnějšímu řešení. Pro zesilovače jsem použil továrně vyráběnou skříň, což je dnes nutný standard, nejedná-li se ovšem o nějaký „ozdobený“ zesilovač stavěný spíše na pokoukání než na hraní. I kombinace obojího (pokoukání i hraní) je možná - o tom svědčí nádherné konstrukce některých amerických a i tuzemských zesilovačů, viz např. zesilovače MESA BOOGIE.

Postačující výška pro jednokanálový zesilovač jsou dva „rack“ moduly, tj. 89 mm, do této výšky se vejdou s malou rezervou nejen vstupní elektronky předzesilovače umístěné na výšku, ale i dostatečně dimenzované chladiče (případně i s ventilátorem 80 mm) a toroidní síťový transformátor.



Obr 3a. Díly prototypové skříně zesilovače



Obr 3b. Sestavená skříň zesilovače

Hloubka skříně byla volena u různých typů zesilovačů podle skutečné potřeby prostoru. Koncové výkonnější zesilovače a výkonné nástrojové zesilovače byly vestavěny do skříně o hloubce 350 mm, nástrojové zesilovače s výkonem 200 a 150 W do skříně o hloubce 300 a 250 mm.

Upozorňuji - všechny výkony koncových zesilovačů zde uváděné jsou (možná na rozdíl od většiny továrních výrobků) výkony reálně naměřené, sinusové a bezpečně trvale dosažitelné při zkreslení koncového stupně do 0,5 %. Připadá mi to tak pravdivější a hlavně je to pohodlnější - není třeba se zabývat nějakým impulsním měřením nebo využívat nereálné a spíše „teoretické“ tvrdé externí zdroje, které stejně nikdo nemá. Proto je pro všechny konstruktéry určité jednodušší změřit efektivní sinusové napětí U na reálné odporové zátěži R a vypočítat výstupní výkon P podle vzorce $P = U^2/R$. Hudební výkon je samozřejmě ještě větší, záleží na tvrdosti zdroje.

Při měření výkonů je také dost velkým oříškem opatřit si odpovídající zatěžovací rezistor. Pro krátkodobá měření lze použít kombinaci rezistorů i pro menší zatížení, nejčastěji rezistory paralelně zapojené. Pro dlouhodobější měření spolehlivosti a oteplení zesilovače se však bez solidního zatěžovacího „odporu“ neobejdeme. Máte-li štěstí, lze občas na burzách koupit posuvné nebo i starší otočné proměnné zatěžovací rezistory pro zatížení kolem 100 W i více (obr. 4), které lze samozřejmě i přetížít, zajistíme-li jejich vhodné chlazení (v extrémních případech vodní nebo olejové). Neseženeme-li takový rezistor, lze zátěž vyrobit z odporového drátu nebo poskládat ji z mnoha menších rezistorů. Doporučuji vyrobit si zátěž s možností přepínat nebo plynule měnit odpor mezi hodnotami 2, 4, 8 a 16 Ω .

Nepokoušejte se hned ze začátku jako zátěž pro testování koncových zesilovačů použít přímo reproduktory! Za prvé - uši máme jen dvě, a za druhé - kdo si myslí, že levnější neznámkový reproduktor, prezentovaný v katalogu prodejce třeba jako „200 W MUSIC POWER“ nebo „200 W PEAK POWER“ apod. vydrží sinusových 200 W třeba po dobu 30 s, tak je na omylu! Bohužel potvrzeno i vlastní, a to opakovanou zkušeností. Je to i logické - kam a kudy

by se to ztrátové teplo při malých rozměrech a účinnosti kmitacíh systémů u levnějších reproduktorů vyzářilo!

I proto po špatných a drahých zkušenostech s levnějšími výrobky jsme nakonec přešli na dražší, ale mnohem spolehlivější řady reproduktorů, a těmi jsou také reproduktorové soustavy, popsané v dalším pokračování, osazené.

Elektrické řešení zesilovačů

Vstupní zesilovače

Vstupní zesilovače popisovaných zesilovačů jsou osazené elektronkami. Nejen vzhledem k současnému trendu, kdy každé trochu lepší tovární zařízení musí alespoň jednu elektronku (lidově a hudebníky nazývanou „lampu“) obsahovat, i kdyby v něm měla jen svítit.

Jedním z důvodů pro používání elektronek je snaha továrně prodávané zařízení s elektronekami zdrazit oproti „obyčejným“ integrovaným obvodům nebo tranzistorům. Elektrony se dnes používají nejen v nástrojových zesilovačích, ale i v mixážních pultech, efekto- vých procesorech a kytarových „krabičkách“, mikrofonních předzesilovačích, harddiskových nahrávacích systémech a vůbec asi ve všem.

Ale není to jen komerční záležitost. Po mnoha srovnávacích poslechových testech, při kterých jsme porovnávali zvuk zesilovačů osazených na vstupu buď elektronekami, a nebo tranzistory a integrovanými obvody řady NE, NJM, TL a dalšími, mohu smělé říci, že elektrony jsou pro hudební účely k primárnímu zesílení signálu z elektroakustických nástrojů a i mikrofonů mnohem vhodnější, než cokoliv jiného.

Zesilovače s elektronekami mají příjemnější zvuk při všech stupních vybudnění, správně navržené zesilovače limitují nenásilně, celkový dojem je přirozenější a neunavuje.

Pravý fanda elektronek může ovšem namítnout, že ten správný „lampový“ zvuk vzniká až v koncovém stupni, který my budeme používat „jen“ tranzistorový.

Je to samozřejmě i pravda, ale týká se to především víceméně jednoúčelových kytarových zesilovačů („hlav“ a „komb“), které záměrně pracují až v oblasti přebuzení.

Ale pokud nějakým způsobem zajistíme, aby koncový tranzistorový zesilovač nepracoval nikdy (nebo jen výjimečně) v limitaci, stačí k vytvoření efektu „lampového“ zvuku správně navrženy elektronkový předzesilovač, a koncový zesilovač vlastně jen reprodukuje bez vlastního přibarvení to, co „nastropily“ elektrony v předzesilovači.

Takto jsou zde popsané zesilovače koncipovány a takto pracují i některé továrně vyráběné aparatury - elektronkové mikrofonní a nástrojové „rackové“ předzesilovače, ze kterých se signál přivádí do polovodičových zesilovačů nebo také přímo do mixážního pulstu.

Toto kombinované řešení se používá i u nejkvalitnějších výrobků, např. nejnovější světový hit pro kytaristy - zesilovač MARSHALL MODE FOU - má koncový stupeň 300 W řešen s tranzistorem.

To, aby se na výsledném zvuku co nejméně podepsal náš koncový zesilovač, je zajištěno několika způsoby:

a) Koncový zesilovač je velice kvalitní, se zanedbatelným zkreslením všech typů (včetně TIM - transientního intermodulačního zkreslení a fázového zkreslení) a má velkou rychlost přeběhu. V porovnání se zbytkem zapojení se chová asi jako „aktivní drát“, jak později uvidíte při oživování.

b) Koncový zesilovač je v popsáných nástrojových zesilovačích výkonově značně předimenzován a nikdy nebude asi využíván na maximum.

c) Koncový zesilovač lze doplnit jako příslušenství limitérem s optimalizovanou charakteristikou omezení a časy reakce a doběhu. Limitér využívá dostupný lineární optočlen se zaručeným malým harmonickým zkreslením a bude popsán v dalším pokračování.

d) Napětovou rozvahou u obvodů předzesilovačů je zajištěno, že při přebuzení nastává případné omezení signálu (a to i žádané) v předzesilovači, a nikoliv až v koncovém stupni.

Při konstrukci elektronkových předzesilovačů jsem zašátral ve svých 30 a více let starých znalostech a ožil si teorii elektronek. Následovalo studium schémat továrních zesilovačů, kterých jsou stovky na internetu, a zjistil jsem, že za ty desítky let se na elektronekách prakticky nic nezměnilo. Zapojení různých výrobců jsou si velmi podobná a pokud se někde objeví něco nového, nebývá to vždy přijato s úspěchem.

Jak elektrony pracují

Myslím si, že to pro mladší generaci neškodí připomenout.

Elektronka (v řeči hudebníků „lampa“) je ve skleněné vyčerpané baňce zatavená katoda, kolem ní anoda a mezi nimi jedna nebo více mřížek.

Katoda je uprostřed systému a je v provozu žhavená, a to buď přímo, nebo u většiny elektronek nepřímou.

Při přímém žhavení je katoda realizována jako vodič vyhřívaný průcho- dem žhavicího proudu.

Při nepřímém žhavení je katoda zhotovena z kovové duté trubičky, ve které je izolované (k izolaci se používá keramický povlak) umístěno žhavicí vlákno, které trubičku vyhřívá zevnitř.

Rozžhavená katoda má schopnost emitovat elektrony. Na povrchu trubičky (nebo vlákna přímo žhavené katody) je nanášena emisní vrstva z kyslíčků kovů vzácných zemin, která má za úkol zvětšit emisní schopnost katody, resp. snížit potřebnou emisní teplotu katody.

Všechny elektrony, které se používají dnes v nf technice (kromě některých usměrňovacích), jsou nepřímou žhavené.



Obr. 4. Zatěžovací rezistory o zatížitelnosti 100 W

Jako žhavicí napětí pro vyhřívání katody se ustálilo napětí 6,3 nebo 12,6 V, u některých usměrňovacích elektronkách pak 5 V (GZ34) nebo 4 V (AZ1, AZ11, AZ12 atd.).

Nepřímé žhavení katody je možné jak střídavým, tak i stejnosměrným proudem. Stejnosměrné žhavení má výhodu v tom, že lze u předzesilovačů dosáhnout lepšího odstupu signálu od brumu. Při střídavém žhavení se musí brum většinou kompenzovat (potlačovat) zvláštními obvody. Proto budeme raději používat stejnosměrné žhavení a sériové zapojení žhavicích vláken elektroněk ECC83 a ECC82. Pak je při žhavicím napětí 12 V odběr žhavicího proudu jedné elektronky ECC83 nebo ECC82 asi 150 mA, a to zvládne integrovaný stabilizátor.

Anodu elektronky tvoří plechový válec obtočený kolem katody, resp. kolem mřížky.

Nejjednodušší elektronka se nazývá dioda a má jen katodu a anodu. U diody se ale proud elektronů mezi katodou a anodou za daných podmínek nedá řídit - je ovlivněn jen teplotou katody a anodovým napětím. Taková elektronka nezesiluje, nemá žádný vstup a výstup, a je vhodná jen pro usměrňování (obdobu polovodičové diody).

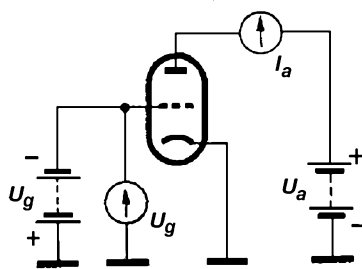
Pokud do diodového systému vložíme mezi katodu a anodu mřížku, můžeme napětím na této mřížce ovlivňovat proud mezi katodou a anodou. Zápornějším napětím (vůči katodě) se anodový proud zmenší, kladným napětím se proud elektronkou zvětší. Ovládání anodového proudu elektronky napětím mřížky je obdobou ovládání kolektorového proudu tranzistoru proudem báze.

Elektronka s jednou mřížkou se nazývá trioda a její základní zapojení se společnou katodou (ve kterém se měří charakteristiky elektronky) je na obr. 5. Všimněte se, že proud elektronkou je ovlivněn napětím na mřížce. Řízení nevyžaduje téměř žádný proud. Elektronka má tedy velký vstupní odpor a je řízena prakticky jen napětím, na rozdíl od tranzistoru. Samozřejmě to platí jen ve stejnosměrném režimu, při provozu elektronky v nf (a především ve vf) režimu se uplatňují kapacity mřížky vůči ostatním elektrodám.

V zesilovači je mezi anodu elektronky a zdroj anodového napětí zařazen pracovní (anodový) odpor. Změnou napětí mřížky lze vyvolat změny anodového proudu a tedy změny úbytku na tomto pracovním odporu.

Jelikož mřížka musí být vždy proti katodě záporná (jinak by převzala částecně funkci anody a tekla by jí mřížkový proud, místo anodového), je nutné v obvodu vytvořit potřebné záporné předpětí, aby elektronka pracovala v lineární oblasti svojí charakteristiky.

To lze zajistit několika způsoby, z nichž nejjednodušší je zapojit do série s katodou odpor, na kterém protékající katodový proud (rovnající se u triody anodovému proudu, protože mřížkou



Obr. 5. Základní zapojení triody se společnou katodou. U_a je anodové napětí, U_g je mřížkové napětí

nic neteče) vytvoří potřebný úbytek napětí. Mřížka se přes velký odpor řádu MΩ připojí na zápornější konec tohoto katodového odporu, zpravidla na zem.

U koncových výkonových elektroněk by rezistor v katodě vadil a hřál, proto se záporné předpětí získává ve zvláštním zdroji záporného napětí.

Na mřížku se přivádí mimo záporného předpětí i malé střídavé napětí, které vyvolává střídavé změny anodového proudu, a ty pak vyvolávají velké střídavé změny úbytku napětí na anodovém odporu. Elektronka v zapojení se společnou katodou tedy napětově i proudově (a tudíž i výkonově) zesiluje.

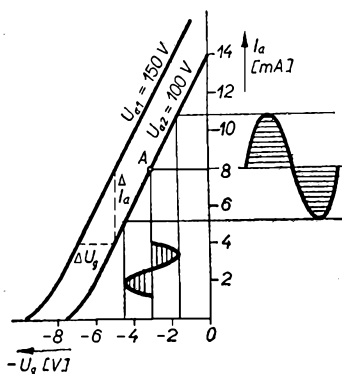
Má-li se ovládat anodový proud bez zkreslení, musí být předpětí řídicí mřížky voleno přibližně ve středu křivky, která se nazývá mřížková charakteristika. Mřížková charakteristika vyjadřuje závislost průběhu anodového proudu I_a na mřížkovém napětí U_g při určitém anodovém napětí U_a a její příklad je na obr. 6.

Elektronky použité v našich zapojeních jsou konstruovány tak, aby velikosti napětí a odporů vycházely rozumně, a postavit s nimi zesilovací stupeň je velmi jednoduché.

Při volbě pracovních podmínek elektroněk jsou pro nás důležité jejich statické parametry. Najdeme je v katalogových listech elektroněk, třeba na internetu.

Důležitá je např. strmost S , která je definována jako poměr změny anodového proudu ΔI_a ke změně napětí na mřížce ΔU_g :

$$S = \Delta I_a / \Delta U_g \quad [\text{mA/V; mA, V}].$$



Obr. 6. Příklad mřížkových charakteristik triody

Strmost není parametr konstantní, ale mění se podle pracovního bodu a v okrajích pracovní charakteristiky elektronky se zmenšuje. Nás zajímá samozřejmě velikost strmosti v lineární pracovní oblasti.

Dalším parametrem elektronky je průnik D , který je definován vztahem $D = (\Delta U_g / \Delta U_a) \cdot 100$ a udává se v % při daném konstantním anodovém proudu. Je to vlastně převrácená hodnota pro nás možná logičtějšího napětového zesilovacího činitele μ elektronky.

Pro návrh zatěžovacích a přizpůsobovacích obvodů předzesilovačů a pro návrh výstupních transformátorů koncových stupňů je důležitý další parametr elektroněk, a to jejich vnitřní odpor R_i . Je vyjádřen vztahem $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$ při konstantním napětí mřížky.

Nebudu vás zatěžovat Barkhausenovou rovnicí, podle které se součin strmosti, průniku a vnitřního odporu elektroněk rovná jedné. Na základě této rovnice lze tedy vypočítat některý parametr, známe-li zbývající dva, ale nebude to asi potřeba.

Napětový zesilovací činitel μ triod obecně je poměrně malý, u ECC82 je to jen 17, u ECC83 asi 100. Vnitřní odpor u ECC82 je 7,7 kΩ, u ECC83 pak 62,5 kΩ. Tyto parametry nám však v předzesilovačích pro hudební účely vyhovují. Horší je kapacita mezi anodou a mřížkou u ECC83 - ta omezuje horní kmitočtový rozsah u zdrojů signálu s velkým vnitřním odporem (kytarové snímače, některé mikrofony, ale i potenciometry a korekční stupně) a většinou je nutné ji v zapojení kompenzovat, což výrobci zesilovačů také činí.

Pentody jsou elektronky, které mají mezi první - řídicí - mřížkou a anodou ještě další dvě mřížky. Přidané mřížky odstraňují nevýhody triody - např. druhá mřížka (směrem od katody) g_2 zmenšuje kapacitu mezi řídicí mřížkou a anodou. Typický průběh mřížkových a anodových charakteristik pentody je na obr. 7.

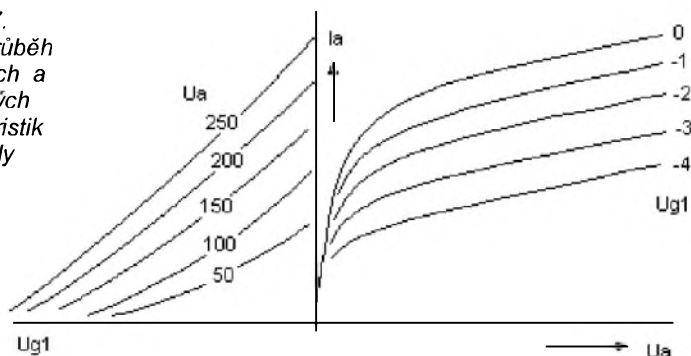
Pentoda má oproti triodě větší zesílení, lepší linearitu a podstatně menší kapacitu mezi řídicí mřížkou g_1 a anodou (což je výhodné u vf aplikací).

Na rozdíl od triody, která zkresluje druhou harmonickou, vytváří pentoda zkreslení třetí harmonickou, což je nežádoucí.

Pentody sice nemají nevýhody triod a mají i větší napětové zesílení, ale v nástrojových předzesilovačích se vzhledem k charakteru zkreslení nepoužívají. Při přebuzení nelze s pentodami dosáhnout žádaného zvuku a záměrného „kulatého“ zkreslení u kytarových zesilovačů a naopak zvuk je „obohacen“ nepříjemně znějícími lichými harmonickými, podobně jako v tranzistorových zesilovačích.

Jednotlivé elektrody elektroněk se značí písmeny: a je anoda, k je katoda, g_1 je první (řídicí) mřížka, g_2 je druhá (stínící) mřížka atd., f je žhavení.

Obr. 7.
Typický průběh
mřížkových a
anodových
charakteristik
pentody



Často jsou v jedné baňce vestavěny dva nezávislé systémy, to je i případ dvojitých triod ECC83 a ECC82, použitých v našich konstrukcích.

Pro informaci ke značení elektronek - písmeno E znamená jmenovité žhavicí napětí 6,3 V (ale ECC82 a ECC83 lze žhavit i napětím 12,6 V při sériovém zapojení žhavicích vláken, proto se také ECC83 „americky“ jmenují 12AX7).

Významy písmen a čísel u evropského značení elektronek:

První písmeno udává žhavicí napětí. U elektronek určených pro sériové žhavení (např. u televizních) se udává žhavicí proud.

- A - žhavicí napětí 4 V,
- D - žhavicí napětí 1,2 nebo 1,4 V,
- E - žhavicí napětí 6,3 V,
- G - žhavicí napětí 5 V,
- P - žhavicí proud 300 mA,
- U - žhavicí proud 100 mA,
- V - žhavicí proud 50 mA.

Druhou částí znaku je písmeno nebo skupina písmen, udávající typ systému. Sdružené systémy mají znak složený z několika písmen.

- A - dioda, B - dvojitá dioda,
- C - trioda s malým výkonem (např. ECC83 apod.)
- D - koncová trioda
- E - tetroda
- F - pentoda s malým výkonem
- H - hexoda, heptoda
- K - oktoda nebo pentagrid
- L - koncová pentoda (např. EL34, EL84 apod.)
- M - elektronkový světelný indikátor (magické oko)
- B - eneoda
- W - jednocestný usměrňovač plynový
- X - dvoucestný usměrňovač plynový
- Y - jednocestný usměrňovač vakuový
- Z - dvoucestný usměrňovač vakuový

Třetí část znaku tvoří číselná skupina určující patici a vývojový typ.

- 1 až 10 - různé patice (P, oktál, nožičková)
- 11 až 15 - patice T
- 16 až 19 - patice P, oktál
- 20 až 29 - patice loktál, s výjimkou bateriové řady D21 a DF22
- 30 až 39 - patice oktál

- 80 až 89 - patice noval
- 90 až 99 - patice heptal
- 180 až 189 - patice noval
- 200 - patice dekal
- 500 - patice magnoval
- 800 - patice noval

Americké označování elektronek je odlišné. První číslo udává přibližné žhavicí napětí, následující písmeno nebo skupina písmen vyjadřuje typ a číslo na konci určuje počet vývodů - žhavicí vlákno se však považuje za jediný vývod. Některé elektrony se značí pouze číselně.

Pokud se setkáme s označením elektronek, kde jsou symboly přehozeny nebo doplněny dalším znakem (např. ECC803S, E83CC, E34L), tím lépe, jedná se o elektronku zvláštní jakosti, ořezanou, s úzkými tolerancemi a zvýšenou spolehlivostí a životností. Její vývody bývají dokonaleji povrchově upravené, vnitřní systém a jeho izolační držák bývá robustnější.

Některé výrobci přidávají další označení, např. „SPEC“, červený či zlatý potisk typu atd. Snahou je odlišit se od ostatních výrobců. Stejně označené elektrony nebo jejich ekvivalenty mohou mít různý „zvuk“, jak se dočteme v odborných časopisech, ale v tom jsou spíše obchodní zájmy. Naměřit to nejde, jak jsem zkoušel, ovšem pokud je elektronka samozřejmě dobrá. Elektrony z výroby n. p. TESLA, pokud je ještě seženeme, snesou nejvyšší měřítka, obzvláště typy zvláštní jakosti - ECC803S, ECC802S a vojenské označené zkříženými meči. Zkoušel



Obr. 8. Dvojitě triody typu ECC83 (803)

jsem ECC83 české, anglické, německé ze SRN i NDR, čínské, ruské a sovětské a výsledek se nikterak nelišil. Varoval bych snad pouze před polskými starými elektronikami, které bývají často mikrofonní.

Horší je to s koncovými EL34. U těch při přetížení poměrně rychle klesá emisní schopnost, často se při odpojení reproduktoru za chodu zesilovače prorážela izolace na bakelitové patici elektrony. Zahraniční EL34 jsou velice drahé, obzvláště párované a jinak „vybírané“. Takže další důvod, proč použít raději tranzistorový „konec“.

V hudebních předzesilovačích se používají zásadně triody, nejčastěji ECC83 (obr. 8), které vznikly již v 60. letech. Jejich americké ekvivalenty mají označení 12AX7. Občas jsou některé stupně zesilovačů osazeny i elektronikami ECC82, které jsou vhodnější spíše pro buzení dalších stupňů s menším vstupním odporem nebo pro inventory.

Triody v ECC83 mají velké napěťové zesílení a velký vnitřní odpor. ECC82 je zapojením vývodů shodná s ECC83 a obě elektrony jsou v podstatě i záměnné. ECC82 má menší napěťové zesílení a menší vnitřní odpor (než ECC83), takže je schopná pracovat i do relativně malého zatěžovacího odporu, do kterého odevzdá dostatečný výkon. To je vhodné při navazování tranzistorových stupňů za předzesilovače.

Nf pentody určené speciálně pro nf předzesilovače, jako např. EF86 a její kvalitnější verze EF806S apod., se v nástrojových zesilovačích nepoužívají, výjimek je minimum. Mají charakteristiky příliš podobné tranzistorům, a to je přeci v hudební elektronice nežádoucí.

S pentodami se proto setkáme jen při konstrukci koncových zesilovačů, kde by výkonové triody vyžadovaly velké napájecí napětí a nebylo by možné s nimi dosáhnout za přijatelných napěťových podmínek velkých výkonů. Občas se ale u kytarových „hlav“ (zesilovačů) používají přepínatelné koncové stupně trioda/pentoda. Je to vyřešeno přepínáním přířezek elektronek nebo v extrémním případě dvojitým osazením koncového stupně oběma typy elektronek. Zesilovače vyráběné na za-



Obr. 9. Koncové pentody EL34 a EL84

kázku pro náročné kytaristy mohou být vybaveny podle přání zákazníka různými druhy elektronek, a to i triodami, resp. pentodami v triodovém zapojení.

Jako koncové elektronky se používají především EL34, americké 6L6 a pro menší výkony EL84 (obr. 9). Občas se setkáme i s opravdu historickými typy, třeba s 4654, a v zesilovačích zámořských výrobců i s dalšími drahými typy výkonových elektronek.

Koncové stupně jsou téměř vždy dvojčinné, jen některá nejmenší „domácí“ komba s výkony kolem 4 W mají zesilovače s jednou elektronkou (EL84) pracující v jednočinném zapojení ve třídě A.

V domácích Hi-Fi zesilovačích tzv. HIGH-END třídy je vše jinak, čím starší elektronka, tím asi lépe, proto jsem na internetu našel zesilovače nejen s 4654, ale i s historickými, původně předválečnými kousky, jako AL4, EL12 apod.

Občas se používají i televizní elektronky EL500, EL504, EL509, EL519, které mají výhodu v malé zatěžovací impedanci, a v určitých kompromisních zapojeních se obejdou bez výstupního transformátoru.

Koncové elektronky jsou v zesilovačích proti katalogovým údajům a profesionálním výrobkům značně přetěžovány. Vždyť např. v modulových zesilovačích pro ozvučení kin se v šedesátých letech u nás používaly koncové zesilovače s osazením 2x EL34, které měly jmenovitý výkon, tuším, 15 W. Dnes jsou stejnou dvojicí elektronek osazovány zesilovače s udávaným výkonem kolem 60 až 80 W. Není pak divu, že elektronky mají v těchto podmínkách krátkou dobu života a je potřeba často je měnit. A elektronky nejsou dnes vůbec nic levného.

Počet elektronek v předzesilovačích bývá různý - od jedné do pěti i více.

Předzesilovací stupně zesilovačů pro kytary a někdy i jiné nástroje jsou řešeny často jako vícekanálové, to v této terminologii neznamena vícekanálový prostorový zvuk, ale to, že vstupní signál z nástroje si hudebník přepíná a zesiluje ve dvou nebo více předzesilovačích, z nichž každý má jiné vlastnosti. Může mít nejen jinak nastavené korekce, ale také zesílení a záměrně vyvolané zkreslení přebuzením. Pak má možnost rychle přepínat mezi jednotlivými předzesilovači a přizpůsobit tak charakter zvuku nástroje svým potřebám a potřebám hudebního žánru.

Technicky je to realizováno buďto přepínáním celých kompletních předzesilovacích stupňů nebo jen přepínáním různě nastavených potenciometrů a rezistorů, určujících zisk, vybuzení a korekce jednotlivých stupňů předzesilovače.

Vyskytují se i řešení velice kombinovaná a komplikovaná, součástí elektronkových předzesilovačů bývají různé diodové omezovače, upínací obvody, polovodičové omezovače, někdy elektronky záměrně pracující v nezvyklých

Obr. 10.
Zesilovač
FENDER



Obr. 11.
Zesilovač
MARSHALL



Obr. 12.
Zesilovač
MESA
BOOGIE



provozních režimech atd. Snahou výrobců takovýchto zařízení je nabídnout nový zvuk, ale většinou se hudebníci vrací ke klasickým aparátům.

Příkladem mohou být např. kytarové zesilovače firem Fender, Marshall, Mesa Boogie (obr. 10 až obr. 12) a další, které jsou obvodově až na výjimky poměrně jednoduché. Elektronky v nich pracují téměř v základním „katalogovém“ zapojení a výsledný zvuk je dán spíš „fintami“, kterými se jednotlivé aparáty liší.

I naše předzesilovače vycházejí samozřejmě z osvědčených zapojení světových výrobců. Jsou jen doplněny o obvody, které přizpůsobují elektronky tranzistorům koncového stupně, ale nebojte se, tyto obvody nikterak charakter zvuku nezhorší. Zapojení nejsou komplikovaná, zapojování je spíše věcí mechanickou - v předzesilovacích nejsou použity plošné spoje, neboť součástek je málo a spoje by nebyly využity. Navíc objímky elektronek, které jsou zapájeny v desce s plošnými spoji, patří k nejporuchovějším součástkám zesilovačů. Jako nosné body součástek proto slouží jen několik pájecích bodů a objímky elektronek. Výhodou je přehlednost, krátké vývody a tudíž malé nebezpečí brumu a oscilací. Zapojení je variabilní a lze je snadno přizpůsobit požadavkům hudebníků.

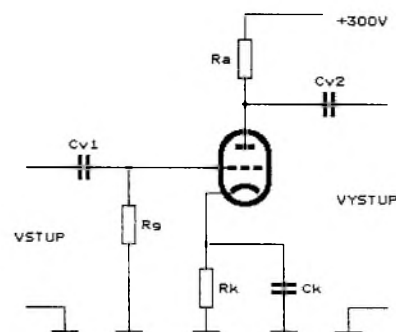
Zapojení zesilovacích stupňů s elektronkami

Na obr. 13 je základní zapojení zesilovacího stupně s elektronkou – triodou, **zapojení se společnou katodou**.

Jednotlivé součástky mají následující význam:

R_g je mřížkový rezistor, přivádějíci na mřížku potenciál země (společného vodiče napájení). Obvyklý odpor rezistoru R_g je kolem 1 MΩ.

R_k je katodový rezistor elektronky, průchodem proudů na něm vzniká úbytek napětí, kterým se katoda stává kladnější než mřížka. Velikost R_k = U_g/I_a, kde U_g je mřížkové předpětí a I_a je



Obr. 13. Základní zapojení zesilovacího stupně s elektronkou - triodou, zapojení se společnou katodou

anodový proud. Obvyklý odpor R_k pro ECC83 je 1 k Ω .

R_a je zatěžovací anodový rezistor elektronky, na kterém změny anodového proudu vyvolávají změny napětí. Obvyklý odpor R_a pro ECC83 je 100 k Ω .

C_{v1} a C_{v2} jsou vazební kondenzátory, které oddělují stejnosměrnou složku signálu pro další stupně. Jejich kapacita určuje spodní přenášný kmitočet a bývá 10 až 68 nF. Musí být dimenzovány na plné napájecí anodové napětí a musí mít malý svodový proud.

Pro minimální kapacitu C_v vazebních kondenzátorů platí vztah:

$$C_v > 1/(2\pi \cdot f_{min} \cdot R_i) \quad [F; Hz, \Omega],$$

kde f_{min} je minimální přenášný kmitočet a R_i je součet výstupního odporu stupně předcházejícího před kondenzátorem a vstupního odporu stupně následujícího za kondenzátorem.

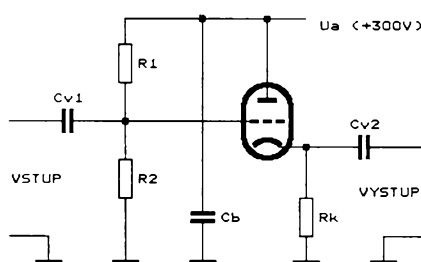
C_k je blokovací katodový kondenzátor. Protože na katodovém rezistoru vzniká záporná zpětná vazba, která zmenšuje zesílení elektronky, blokuje se tento rezistor pro střídavé napětí paralelně zapojeným kondenzátorem. Chceme-li dosáhnout blokování v celém nf pásmu a vyrovnané kmitočtové charakteristiky, volí se kondenzátor s kapacitou asi 50 až 100 μF . S výhodou lze tento kondenzátor zmenšit a blokovat tak katodový rezistor jen pro vyšší kmitočty. Tím se dosáhne většího zesílení stupně na kmitočtech nad pólem charakteristiky této RC kombinace a částečně se tak kompenzuje vstupní kapacita elektronky. Pro minimální kapacitu C_k katodového kondenzátoru C_k platí rovnice:

$$C_k > 1/(2\pi \cdot f_{min} \cdot R_k) \quad [F; Hz, \Omega].$$

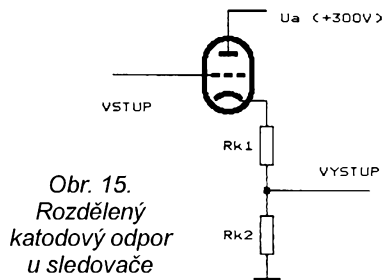
Pokud jako katodovou kombinaci použijeme např. sériový laděný obvod, lze dosáhnout zdvihu kmitočtové charakteristiky na rezonančním kmitočtu tohoto obvodu, ovšem rezonanční obvod je ztlumen paralelním katodovým odporem a vnitřním odporem katodového obvodu elektronky, takže zdvih není příliš výrazný. Přesto toto modifikované zapojení někteří výrobci zesilovačů používají jako obvod prezenze (zdůraznění určitého kmitočtového pásma).

Naopak při použití paralelního rezonančního obvodu lze dosáhnout poklesu v části přenášeného kmitočtového pásma.

Na obr. 14 je schéma katodového sledovače - elektronka pracuje v **zapojení se společnou anodou**.



Obr. 14. Katodový sledovač



Obr. 15. Rozdělení katodový odpor u sledovače

Elektronka v tomto zapojení sice napětově nezesiluje (napětí na katodě *sleduje* napětí na mřížce), zapojení ani neobrací fázi, ale výstupní odpor tohoto zapojení je menší, než u zapojení se společnou katodou. Je to obdoba emitorového sledovače s tranzistorem. Toto zapojení se používá především pro impedanční přizpůsobení dalších stupňů s menším vstupním odporem.

Anoda je připojena přímo na zdroj napájecího napětí a výstupní signál se odebírá z katody. Pracovní odpor R_k je zapojen mezi katodou a zemí. V tomto zapojení se vzhledem k poměrně vysokému napětí na katodě poněkud komplikuje nastavení pracovního bodu, ale lze ho vyřešit napětovým děličem s rezistory R_1 a R_2 .

Vzhledem k menší výstupní impedanci než u zesilovače s uzemněnou (společnou) katodou je katodový sledovač vhodný pro napájení např. korekčních stupňů, tranzistorových navazujících stupňů nebo delších vedení, u kterých je nebezpečí indukovaní brumu nebo ztráty nejvyšších kmitočtů vlivem parazitní kapacity kabelu. Ovšem při použití elektronky ECC83 nečekejte výstupní odpor sledovače v řádu stovek ohmů! Pro katodové sledovače by snad byla vhodnější elektronka ECC82, ale jak je vidět ze schémat předzesilovačů světových výrobců, využívají i zde ECC83.

Pokud vyžadujeme ještě další zmenšení výstupní impedance, nezbude, než katodový odpor sledovače rozdělit na dva díly a signál odebírat z dolní části s menším odporem (obr. 15). Pak se ovšem zmenší i maximální výstupní napětí celého stupně a je nutné si udělat rozvahu, zda v tomto stupni nenaštane nežádoucí limitace signálu. Spodní díl katodového rezistoru může být tvořen i potenciometrem, z jeho běžce pak můžeme budit další stupeň, osazený třeba i tranzistorem.

Napájení elektronkových zesilovačů

Napájecí napětí stupňů s elektronkou ECC83, která má velký vnitřní odpor, se volí v rozmezí asi 250 až 350 V. Odběr jedné triody v ECC83 je kolem 2 mA. Napětí musí být velmi dobře filtrováno, protože u triod (i u pentod, ale méně) proniká zvlnění napájecího napětí výrazně do zpracovávaného nf signálu.

V napájecích obvodech triodových zesilovačů se používají dostatečně dimenzované články RC s poměrně velkými kapacitami. Filtrace anodového napětí není velkým problémem, odběr je malý a sériové rezistory mohou mít velký odpor - úbytek napětí na nich není velký.

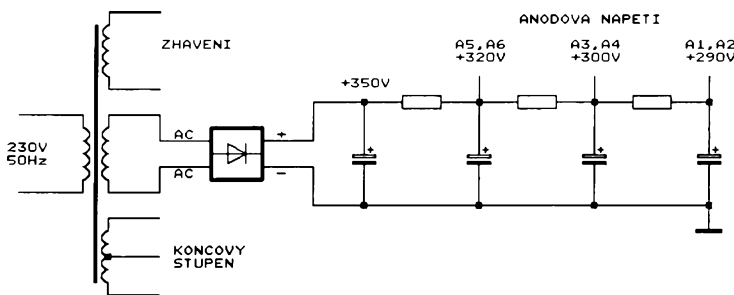
Mřížkové obvody mají velkou impedanci, jsou citlivé na brum a je nutné je dostatečně stínit. Výhodou oproti dřívější elektronkové éře je dnes možnost používat miniaturní součástky. Malá plocha součástek (a tudíž jejich malá rozptylová kapacita) přispívá k menší náchylnosti na indukované brumové napětí.

V některých zapojeních předzesilovačů se záměrně používá velmi malé anodové napájecí napětí, čímž se dosáhne měkké limitace nf signálu již při jeho menší úrovni.

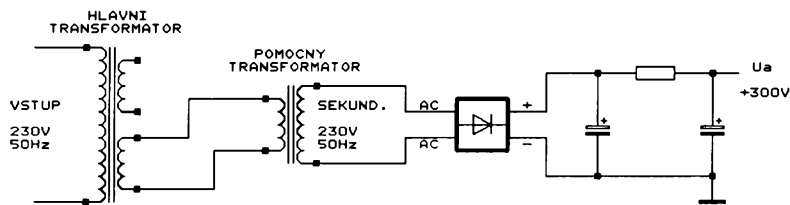
Příklad typického síťového napáječe elektronkového předzesilovače je na obr. 16.

Anodové napájecí napětí ze síťového transformátoru se usměrňuje čtveřicí diod a vyhlazuje řadou obvodů RC. Upozorňuji, že vzhledem k velkému napětí a značným kapacitám filtračních kondenzátorů hrozí u elektronkových zapojení zvýšené **nebezpečí úrazu elektrickým proudem!** Nabití kondenzátory si svůj náboj drží dlouhou dobu, protože nenažhavené elektronky nemají žádný odběr. Proto doporučuji vestavět do zapojení vybíjecí rezistor s odporem asi 0,5 M Ω , zapojený paralelně k prvnímu filtračnímu kondenzátoru.

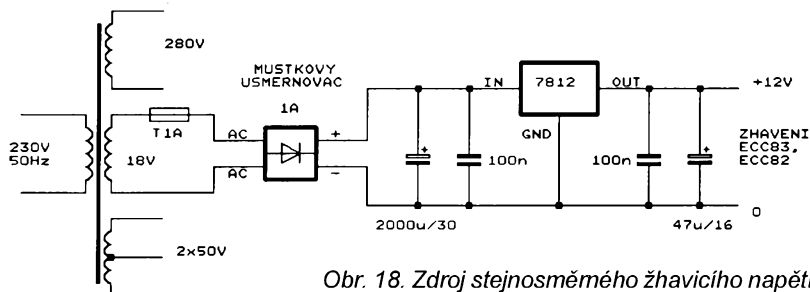
Přestože je anodový odběr předzesilovačů malý, zpravidla ne více než 15 mA, není získávání i přítomnost vysokého anodového napětí v zesilovači příliš příjemná záležitost. Obzvláště pro ty, kteří jsou zvyklí pracovat spíše s polovodiči. Musí se počítat se zvláštním vinutím na transformátoru, musí se dbát zvýšené opatrnosti, a součástky i izolace musí být dimenzovány na „neobvykle“ vysoké napětí atd.



Obr. 16. Síťový napáječ elektronkového předzesilovače



Obr. 17. Způsob získávání anodového napětí pomocí dalšího transformátoru



Obr. 18. Zdroj stejnosměrného žhavicího napětí

Anodové napětí je také možné získávat impulsním měničem. Ovšem měnič nutně musí pracovat na kmitočtu, který leží mimo akustickou oblast, protože jinak se asi nepodaří zbavit se zbytků pískání v nf signálu. Měniče se také obvykle projevují i přímo akusticky. Po četných pokusech jsem tuto možnost zavrhl, a nepoužívám ji, pokud je mi známo, ani žádný z výrobců zesilovačů.

Dalším možným řešením je využití „obrácené“ zapojení síťového transformátoru (obr. 17). Pokud chceme např. rekonstruovat nebo rozšířit hotový zesilovač o elektronkový předzesilovač, a nelze vyměnit síťový transformátor za typ, který by měl navíc i anodové vinutí, lze k sekundárnímu vinutí stávajícího transformátoru zapojit sekundár malého transformátoru a z jeho primárního vinutí, původně určeného pro síťové napětí 230 V, odebrat napětí k usměrnění pro anody. Použité zapojení je potřeba vyzkoušet a kontrolovat odběr přidaného transformátoru - zde nemusí platit úplně přesně transformátorová rovnice. S výhodou jsem u jedné verze zesilovače takto využil známý zalitý transformátor 220 V/24 V/2 VA, určený původně pro napájení kontrolky, a vše funguje k plné spokojenosti.

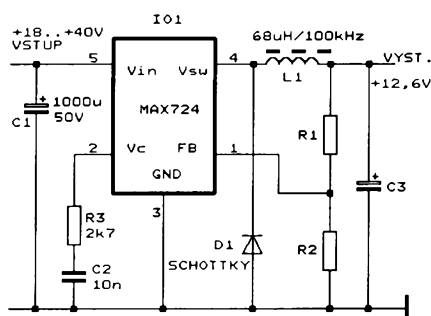
Žhavicí napětí elektronek se získává zpravidla ze zvláštního vinutí, ale nic nebrání tomu, aby toto vinutí bylo využito i pro napájení případných tranzistorových stupňů. Pro žhavení elektroněk řady ECC se u popsanych konstruk-

cích používá napětí 12 V, usměrněné a stabilizované integrovaným stabilizátorem řady 7812 pro proudy 1 A. Odběr jedné elektronky je 150 mA, vlákna jsou zapojena sériově. Pokud máme v zapojení elektronky tři, je odběr 450 mA (a při zapnutí se studeným vláknem ještě výrazně víc), a proto je potřeba stabilizátor účinně chladit. Obzvláště tehdy, napájíme-li tímto napětím ještě např. ventilátory, indikační LED, indikátory vybuzení a další obvody. Žhavicí napětí 12 V je o 5 % menší než potřebné jmenovité 12,6 V, což je naprosto vyhovující.

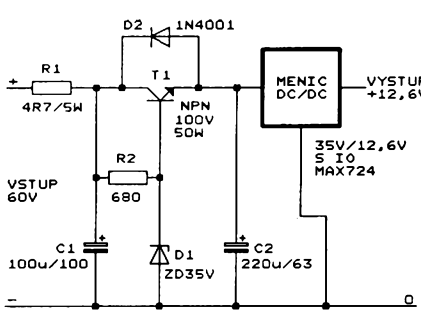
Žhavicí napětí lze také elegantně získávat sestupným měničem přímo z napájecího napětí tranzistorového koncového zesilovače.

Pokud není (ani naprázdno) napětí v kladné větvi větší než +40 V, můžeme třeba použít jednoduchý a velmi dobrý impulsní měnič s integrovanými obvody MAX724 nebo MAX722. Pracují na kmitočtu 100 kHz a samozřejmě neruší v nf oblasti. Schéma měniče je na obr. 19. Pozor pouze na tlumivky - pro 100 kHz nevyhoví každá, komerčně dostupné jsou specifikovány do 50 kHz!

Pokud je napájení kladné větve koncového zesilovače větší než přípustných 40 V pro MAX722/724, lze impulsnímu měniči/stabilizátoru předradit jednoduchý dělič napětí s výkonovou Zenerovou diodou nebo sériový stabilizátor s tranzistorem (obr. 20). Pak je ale účelné zařadit před MAX722/724



Obr. 19. Měnič z maximálně 40 V na 12,6 V s IO MAX724



Obr. 20. Předřazený stabilizátor pro měnič s IO MAX724

transil s napětím asi 35 V jako ochranu proti případným napěťovým špičkám.

Dělal jsem pokusy využít cívku měniče s MAX724 po doplnění dalším vinutím i k výrobě anodového napětí, ale zapojení nevykazovalo potřebné parametry. Tak nezbylo než se vrátit ke klasickému transformátoru.

Závady elektronek

Elektronky mohou mít několik typů závad.

Asi nejčastější závadou, především u výkonových elektronek, je „vyčerpaná“ katoda. Emisní vrstva časem ztrácí svoji schopnost „vysílat“ elektrony. Tuto závadu poznáme podle změny pracovního bodu elektronky, u odporové zátěže se zvětší anodové napětí, zmenší se anodový proud a zisk stupně. U triod malého výkonu řady ECC ovšem tato závada přichází většinou až po dlouhé době provozu, řádově po 10 000 hodin i déle. Ovšem někteří hudebníci mění elektronky mnohem častěji, než by bylo nutné - snaží se tak dosáhnout optimálního zvuku, který nová elektronka produkuje. Možná ale, že by místo výměny stačila malá změna pracovního bodu - v některých zapojeních elektronky pracují s netypicky umístěným pracovním bodem a malá změna parametrů je asi opravdu znát.

Vyčerpání katody se brzy projevuje především u přetížených koncových pentod, např. u EL34, EL84 a 6L6. Vyčerpaná katoda se sice občas opravuje (krátkodobým přetížením katody při přezhavení nebo uvolněním či odpařením vyčerpané emisní vrstvy výbojem), ovšem výsledek není zaručen a bývá krátkodobý.

Další častou závadou je mikrofoničnost elektronek. Ofěsy, kterým jsou elektronky namáhány, časem uvolní slídové držáky systému, což se nejvíce projeví u mřížky. Elektronka je pak citlivá na ofěsy, z reproduktorů se ozývá zvonění při poklepu na elektronku a celý akustický řetězec se může i rozkmitat. Tato závada se projevuje především u elektronek v prvních stupních předzesilovačů, které pracují s malými vstupními signály.

Vyrábějí se elektronky konstruované jako ofěsuvzdorné s robustnějším systémem (ECC803S, ECC802S, E83CC, E82CC) a doporučuji je používat, seženeme-li je.

Oprava „mikrofonní“ elektronky není možná, je nutná výměna. Závady se projevují u elektronek, které jsou namáhány dlouhodobě ofěsy, např. v kombaech pro kytaru a baskytaru, a mohou se zvětšovat, až nastane zkrat elektrod v systému (nejčastěji mřížky s katodou). To může znamenat i poškození zesilovače, obzvláště koncového.

Zkratky v elektronekách se mohou vyskytnout nejen mezi elektrodami, ale někdy i mezi nepřímo žhavenou katodou a žhavicím vláknem. Zmenšený izolační odpor mezi vláknem a katodou se projeví u předzesilovačů brumem,

pokud se používá žhavení střídavým proudem, popř. zkreslením signálu při žhavení stejnosměrným proudem.

Přerušené žhavicí vlákno elektronky je výjimečná závada, pokud je dodržena velikost žhavicího napětí. U jednoduchých elektronek (koncových pentod a usměrňovacích diod) se tato závada pozná snadno - elektronka „nesvítí“. U dvojitých triod vlákno žhaví málo a navíc systémy jsou dva s vlákem s vyvedeným středem, takže je nejlepší elektronku vyjmout a vyzkoušet ji mimo zesilovač, třeba ohmmetrem.

Ztráta vakua v elektronce se vyskytuje obvykle po namáhání koliků elektronky nebo po uražení zátavu. Úplná ztráta vakua se pozná zbledáním „getrového zrcátka“ - stříbřitého až černého povlaku uvnitř vrcholu baňky elektronky. Getr je hmota, která slouží k dočerpání zbytkových plynů v elektronce při výrobě i během jejího života. Je to směs látek, které se po zahřátí snadno slučují s plyny, které zůstanou v baňce po vyčerpání vzduchu. Při výrobě je getr umístěn v kruhové misce v systému elektronky. Po vyčerpání a zatavení baňky se indukčním ohřevem (miska s getrem tvoří závit nakrátko) getr zahřeje a prudce se sloučí se zbytky plynů. Povlak na skle pohlcuje během života elektronky případné další uvolněné plyny. Jeho zbledání indikuje ztrátu vakua. Taková elektronka je samozřejmě nepoužitelná.

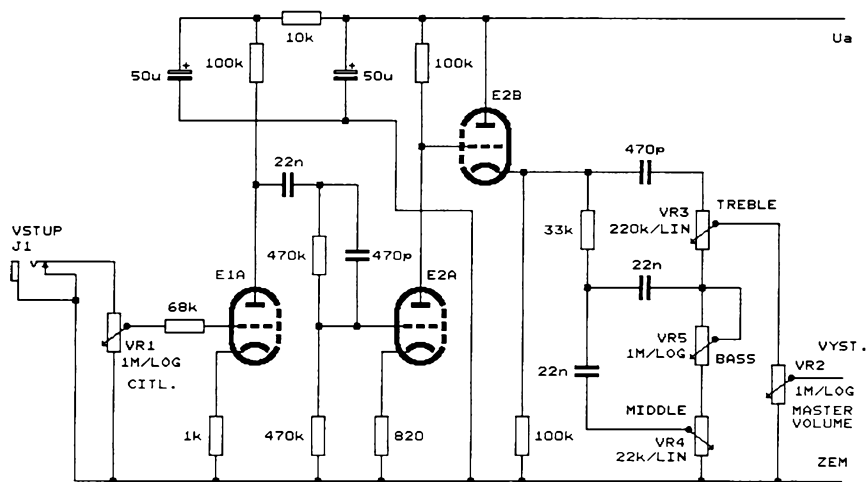
Příklady zapojení předzesilovačů

Nyní uvedu několik zapojení světově známých výrobců elektronkových zařízení pro hudebníky. Zapojení jsou si velice podobná a daly by se jich uvést stovky. Jedná se většinou o obvody kytarových a baskytarových zesilovačů, případně klávesová komba.

Zesilovače určené pro různé nástroje se v podstatě zapojením neliší, rozdíl je především v korekcích. Někteří výrobci (kupodivu i Marshall) vyrábějí komba s úplně stejným zapojením pro kytaru, klávesy i baskytaru, rozdíl je právě v zapojení korekci a samozřejmě v osazení reproduktory.

Schéma jednoduchého předzesilovače se třemi triodami je na obr. 21.

Vstupní zesilovač je tvořen polovinou ECC83 (nebo 12AX7) ve standardním zapojení se společnou katodou. Vstupní signál je přiveden na mřížku ze vstupního potenciometru (GAIN) přímo bez oddělovacího kondenzátoru, což zde nevádí - mřížka je na nulovém potenciálu. Tímto potenciometrem se přizpůsobuje citlivost předzesilovače velikosti výstupního napětí ze zdroje signálu - v tomto případě z kytarového snímače. Zároveň lze většinou při nastavení větší citlivosti dosáhnout přebuzení následujících stupňů a tím záměrného zkreslení signálu. Potenciometr má standardně odpor 1 MΩ, výjimečně se používají potenciometry s odporem ko-



Obr. 21. Jednoduchý předzesilovač se třemi triodami

lem 0,5 MΩ. Většina výrobců používá na tomto stupni potenciometr s logaritmickým průběhem, ovšem setkáváme se i s lineárním průběhem.

Rezistor v přívodu k mřížce slouží spolu se vstupní kapacitou mřížky k potlačení VF složek signálu a také k ochraně elektronky proti náhodnému kladnému napětí, které by se mohlo dostat na mřížku z nějakých zdrojů. Při větším kladném napětí na mřížce elektronka začíná fungovat jako dioda a mřížkou začíná téci proud, který by mohl systémem zbytečně zatížit nebo poškodit.

Vstupní zásuvka jack 1/4" (J1) obsahuje vypínací kontakt, kterým se po zasunutí vidlice jack odpojí vstup zesilovače od země. Katodový rezistor elektronky E1A není blokován kondenzátorem, čímž se zmenšuje její zesílení. Napěťové zesílení tohoto stupně je přibližně 50, vstupní impedance je 1 MΩ a přebuditelnost je značná, takže vyhoví pro nejrůznější zdroje signálu.

Z anody E1A se zesílený signál přivádí přes vazební kondenzátor na mřížku následující elektronky E2A. Někdy se zařazuje mezi první a druhý stupeň předzesilovače potenciometr, kterým se nastavuje základní citlivost předzesilovače. Ovšem popisovaný předzesilovač má regulaci citlivosti přímo na vstupu, a tak mezistupňový potenciometr není použit.

Velikost vazebního kondenzátoru mezi anodou E1A a mřížkou E2A bývá u kytarových zesilovačů asi 10 až 22 nF, u basových a klávesových zesilovačů vyhoví 68 nF. Menší kapacita záměrně omezuje nižší kmitočty.

Druhý stupeň s E2A opět asi 50x napěťově zesílí signál. Výsledné napěťové zesílení je 50x50 = 2500, čili např. z 20 mV vstupního napětí získáme na anodě druhého stupně teoreticky 50 V. Při tomto napětí již druhý stupeň lehce omezuje. A snímače kytar nebo aktivní kytary s předzesilovačem dávají často špičkové napětí několik set mV. Ovšem omezení je „kulaté“, spíše se mění tvar sinusovky na zaoblený. Rozhodně nenastává ostré ořezávání špiček (clipping), jak to známe u tranzistorů a integrovaných obvodů.

Protože omezování je u jednočinných stupňů vždy značně nesymetrické (v každé půlvině má sinusovka zcela jiný tvar), zařazují někteří výrobci pro symetrizaci tvaru za druhý stupeň ještě třetí stupeň, obdobně zapojený, se záměrně nízkým zesílením blízkým jedné. Třetí stupeň je přibližně stejně přebuzený jako druhý stupeň, ale protože zapojení se společnou katodou je invertující, omezuje třetí stupeň v opačné půlvině než druhý stupeň. Tak lze dosáhnout symetrického omezení, je-li žádáno.

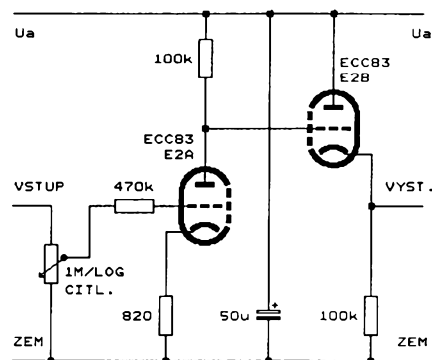
V popisovaném předzesilovači je za druhým stupněm zařazen katodový sledovač s E2B, který je přímo galvanicky navázaný na E2A.

Z katody sledovače s E2B je signál již veden do korekčních obvodů.

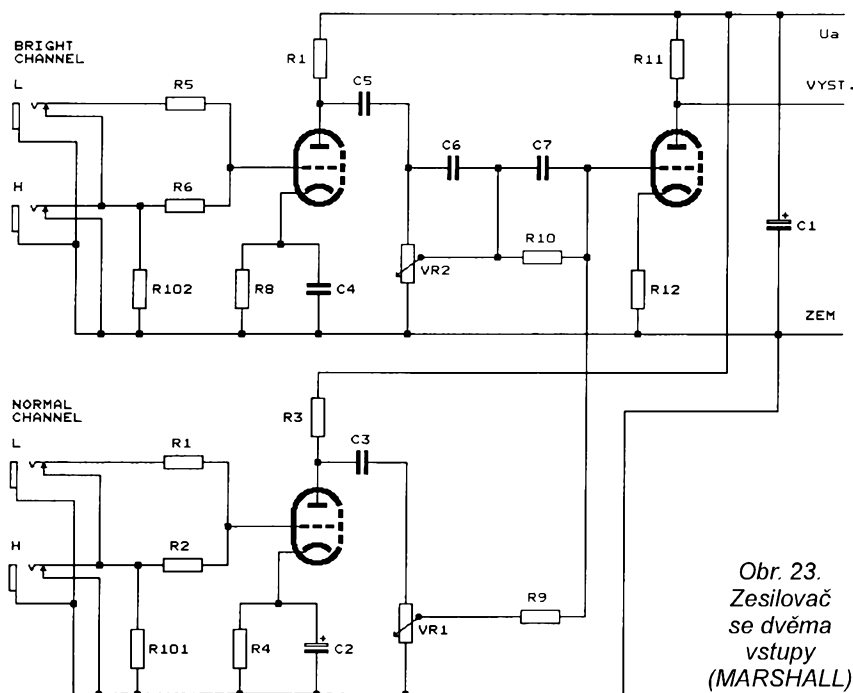
Možnost přímé vazby mezi stupni v zapojení se společnou katodou a společnou anodou je velmi výhodná, proto se kaskádní dvojice zesilovač/sledovač vyskytuje v praxi dosti často (obr. 22).

Předzesilovač z obr. 21 předpokládá pro vyvolání zkresleného zvuku spíše použití předřazené „krabičky“ - boosteru. Zesílení samotného zesilovače (i když je asi 2500) nestačí na důkladné omezení a dostatečně „dlouhý“ tón kytary.

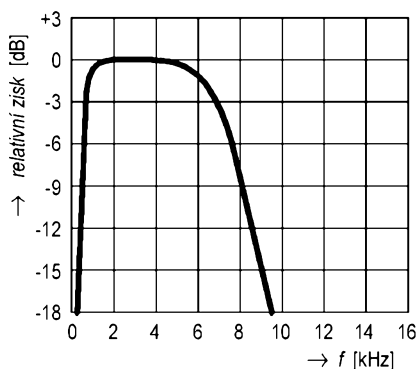
Protože v předzesilovači podle obr. 21 je počet systémů triod vlastně lichý (3 systémy) a elektronky ECC83 jsou dvojité (a obsahují sudý počet systémů triod), využívají výrobci většinou i druhou polovinu vstupní elektronky E1.



Obr. 22. Kaskáda zesilovač/sledovač



Obr. 23.
Zesilovač
se dvěma
vstupy
(MARSHALL)



Obr. 24. Typická kmitočtová
charakteristika zesilovače
s elektronkou bez kompenzace



Obr. 25. Typická kmitočtová charakte-
ristika zesilovače s elektronkou s kom-
penzací poklesu vyšších kmitočtů

Vznikne tak zesilovač se dvěma vstu-
py, jehož typické zapojení je na obr. 23.

V každém vstupu jsou dva konekto-
ry (H a L) s možností zařadit jednodu-
chý dělič (s rezistory R1, R2, R101
atd.). Signály z obou anod prvních elek-
tronek jsou vedeny přes oddělovací
kondenzátory na potenciometry VR1 a
VR2 (o odporu 1 MΩ), z jejich běžců je
signál veden přes oddělovací rezistory
na mřížku další elektronky.

Tak se v předzesilovači využijí
všechny systémy dvou ECC83. Takto
je zapojena naprostá většina zesilo-
vačů.

Aby zapojení nebylo tak jednotvár-
né, jsou oba vstupní zesilovače zapoje-
ny poněkud odlišně - horní vstup je „os-
trý“ (BRIGHT), zatímco dolní vstup je
normální (NORMAL).

Katodový rezistor triody u dolního
vstupu má obvyklý odpor (820 Ω) a je
blokován kondenzátorem s velkou ka-
pacitou kolem 47 μF.

Katodový rezistor triody u horního
vstupu má odpor větší - 2,7 kΩ. Na
něm vzniká silnější záporná vazba, čili
základní zisk zesilovače u horního
vstupu je menší. Ovšem tento odpor
je také blokován, tentokrát mnohem

menší kapacitou 680 nF, takže na vyš-
ších kmitočtech, kde je reaktance kon-
denzátoru již menší, je zisk zvětšen a
nastává zdvih výšek, který se projeví
nejvíce právě v oblasti okolo 8 kHz.

Další odlišnost spočívá v tom, že
anodový vazební kondenzátor u horní-
ho vstupu je menší než u vstupu spo-
dního. Tím jsou u horního vstupu více
potlačeny hlubší kmitočty.

A do třetice - oddělovací rezistor
R10 za potenciometrem VR2 je pře-
mostěn paralelním kondenzátorem C7
s kapacitou 500 pF, který dále způso-
buje zdvih vyšších kmitočtů. A protože
ani to zřejmě nestačí, je běžec potenci-
ometru VR2 propojen s jeho horním vý-
vodem kondenzátorem C6 s kapacitou
50 pF, který především při menších
hlasitostech působí další zdvih vyso-
kých kmitočtů.

Tyto všechny úpravy kmitočtové
charakteristiky mají za úkol kompenzo-
vat nejen vstupní kapacity elektronek,
které tvoří se sériovými odpory inte-
grační články, ale také pokles vyšších
kmitočtů při použití snímačů s velkou
impedancí připojených dlouhými kabely
s velkou kapacitou, a možná i u vyšších
kmitočtů slábnoucí kytaristův sluch.

Vstupní kapacita C_g elektronky v za-
pojení se společnou katodou je:

$$C_g = C_{gk} + C_{ga} \cdot (1 + A_u) \quad [\text{pF}; \text{pF}],$$

kde C_{gk} je kapacita mezi mřížkou a ka-
todou, C_{ga} je kapacita mezi mřížkou a
anodou a A_u je napěťové zesílení elek-
tronky. Složce $C_{ga} \cdot (1 + A_u)$ se říká Mil-
lerova kapacita.

Úpravy kmitočtové charakteristiky
jsou opravdu potřeba, ta část zesilova-
če, která úpravu zdvihu nejvyšších kmi-
točtů nemá, vykazuje významný pokles
zesílení u kmitočtů již nad 3 až 5 kHz
(viz obr. 24). Obzvláště tehdy, je-li sta-
žen potenciometr „ostrého“ kanálu na
minimum - pak tvoří kondenzátor o ka-
pacitě 500 pF spolu s oddělovacím re-
zistorem v sérii s běžcem potenciome-
tru integrační článek. Tyto úpravy
charakteristiky ještě před korekcemi
používají všichni výrobci zesilovačů a
zdvihy výšek jsou výrazné hlavně u ky-
tarových zesilovačů.

U zesilovačů pro jiné nástroje není
kompenzace poklesu vyšších kmitočtů
tak výrazná a jejím úkolem je udržet
spíše kmitočtovou charakteristiku rov-
nou, bez poklesu na výškách (obr. 25).

Ještě bych rád připomenul, že je
zásadní rozdíl v pohledu na domácí
hi-fi přístroje a zesilovače pro hudební
účely. Pokud by nějaký hi-fi fandna
u svého hi-end zesilovače naměřil kmi-
točtovou charakteristiku, odstup signálu
a zkreslení takové, kterou má i ten nej-
dražší hudební zesilovač, jistě by ho
ihned vyřadil. Ovšem my se v tomto
čísle věnujeme elektronice pro hudeb-
níky a tak nám nevyrovnaná kmitočtová
charakteristika nevadí, ba naopak.

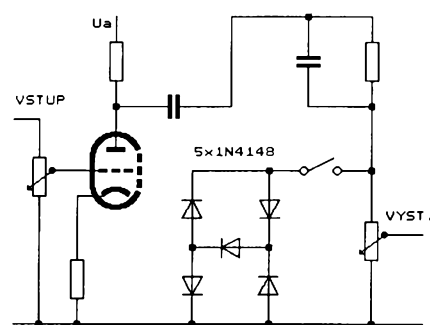
Další stupně jsou u zesilovače se
dvěma vstupy stejné jako u zesilovače
s jedním vstupem na obr. 21.

Občas se mezi stupně předzesilo-
vače pro kytary zapojují další obvody,
které mají za úkol účinněji a s větší sy-
metrií omezit nf signál.

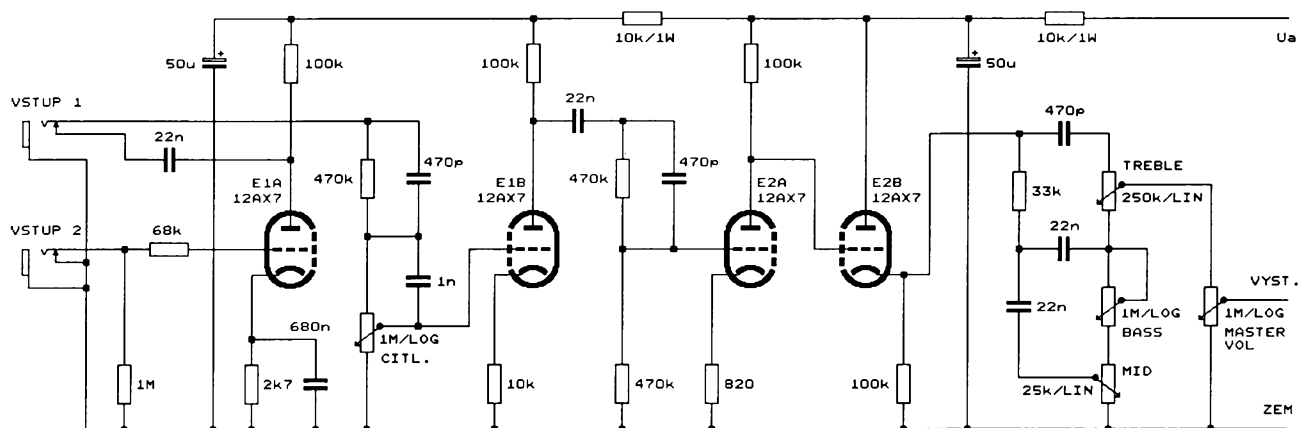
Příkladem jsou zesilovače HIWATT
L100R a L50R, u kterých jsou použi-
ty diodové omezovače signálu podle
obr. 26.

Pokud ale vím, nejsou tyto obvody
kytaristy nijak zvlášť ceněny.

Některé zesilovače jsou řešeny po-
někud jinak, než zesilovač na obr. 23.
Příklad jejich zapojení je na obr. 27.



Obr. 26. Zesilovač HIWATT L100R
s diodovým omezovačem



Obr. 27. Zesilovač s rozpojováním signálové cesty

Mezi prvním a druhým zesilovacím stupněm mají zapojenu rozpojovací zásuvku jack (VSTUP 1). Pokud do ní zasuneme vidlici jack, odpojí se vstupní trioda E1A a signál se přivádí přímo na potenciometr pro ovládání citlivosti. VSTUP 1 s rozpojovací zásuvkou jack je označován jako LOW GAIN (s nízkým ziskem), má asi 50x menší citlivost než VSTUP 2 a je určen především pro aktivní snímáče a „krabičky“, případně pro doprovod. Výhodou je lepší odstup rušivých signálů při odpojení vstupní elektronky a velká přebuditelnost vstupu.

Je-li tento předzesilovač má jen jeden vstup a všechny čtyři systémy elektronky ECC83 jsou využity k zesílení, při zařazení prvního stupně by plné zesílení bylo zbytečně velké. Všimněte si proto umělého snížení zisku neblokovatými katodovými rezistory u druhého a třetího stupně. Také dělič mezi druhým a třetím systémem snižuje zisk, ale jen u nízkých kmitočtů. Opět ani zde nechybí již známá kompenzace nežádoucího úbytku výšek kondenzátory v derivačních člancích.

Velmi podobně jako předchozí zesilovač je řešen i předzesilovač na obr. 28. Zásuvka jack VSTUP 1 tentokrát využívá spínacího kontaktu a při zasunutí vidlice do zásuvky VSTUP 1 se výstup prvního stupně připojuje na vstup druhého stupně. V případě využití vstu-

pu s nižší citlivostí se nepočítá s využitím prvního potenciometru pro nastavení zisku. Obávám se trochu o stabilitu zapojení, na jednom konektoru jsou v těsné blízkosti vstup a výstup předzesilovače. I proto možná výrobce zařadil kompenzační obvod pro zdvih vyšších kmitočtů až do dalších stupňů.

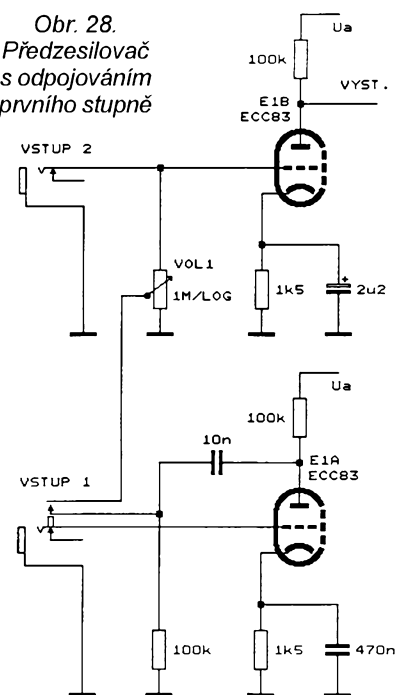
Podrobné schéma dalšího předzesilovače s odpojováním prvního stupně, ve kterém jsou uvedené hodnoty součástek, je na obr. 29.

Předzesilovač z obr. 30 využívá směšování signálů ze dvou vstupů na společném anodovém odporu elektronky ECC83. Přináší to tu výhodu, že odpadají sériové směšovací rezistory, na kterých samozřejmě vzniká úbytek výšek, protože jsou zatíženy vstupní kapacitou elektronky a tvoří s ní integrační členek. Proto nemusí být při použití předzesilovače podle obr. 30 kompenzace výšek tak drastická. Navíc se zmenšuje i šum předzesilovače.

Společný anodový rezistor a téměř paralelně spojené systémy ECC83 mají také výhodu v tom, že se poněkud zmenší výstupní odpor předzesilovače a korekce mohou být navázány přímo, bez katodového sledovače.

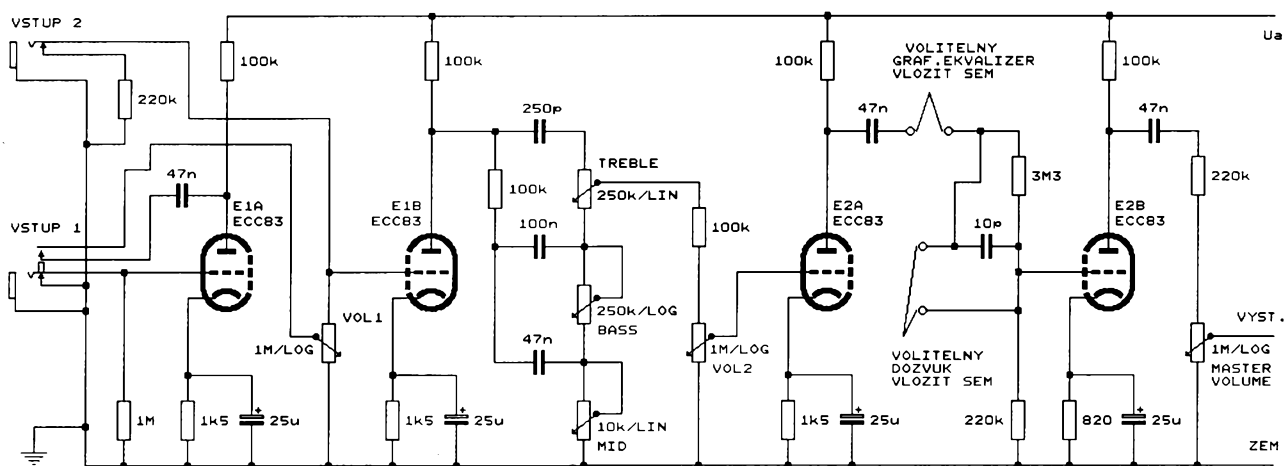
Na obr. 31 je zapojení předzesilovače v zesilovači MESA BOOGIE MARK 2c. U tohoto zesilovače výrobce vřazuje za dvoustupňový předzesilovač v režimu „LEAD“ (vedoucí sólový nástroj) dvoji-

Obr. 28. Předzesilovač s odpojováním prvního stupně

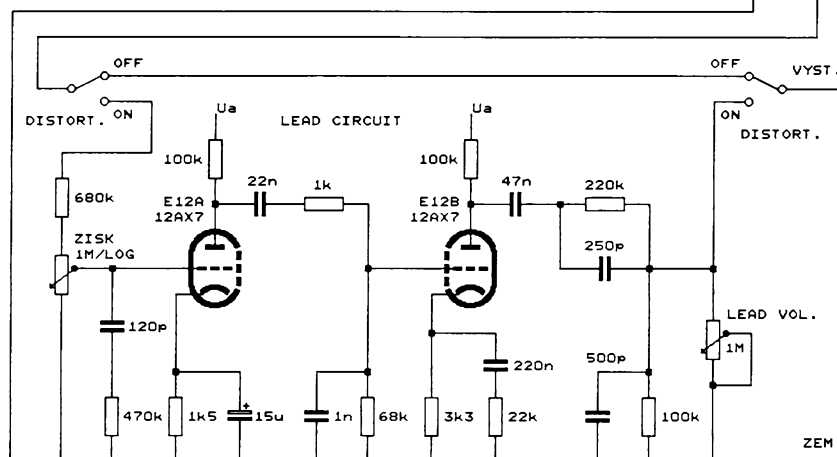
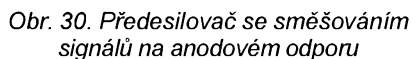


tým přepínačem ještě další dvoustupňový zesilovač. Ten obsahuje další regulátor zisku i hlasitosti, takže je snadné nastavit dvěma potenciometry přebuzení i při nižších úrovních výstupního signálu.

Zajímavé je umístění korekcí hned za prvním stupněm.



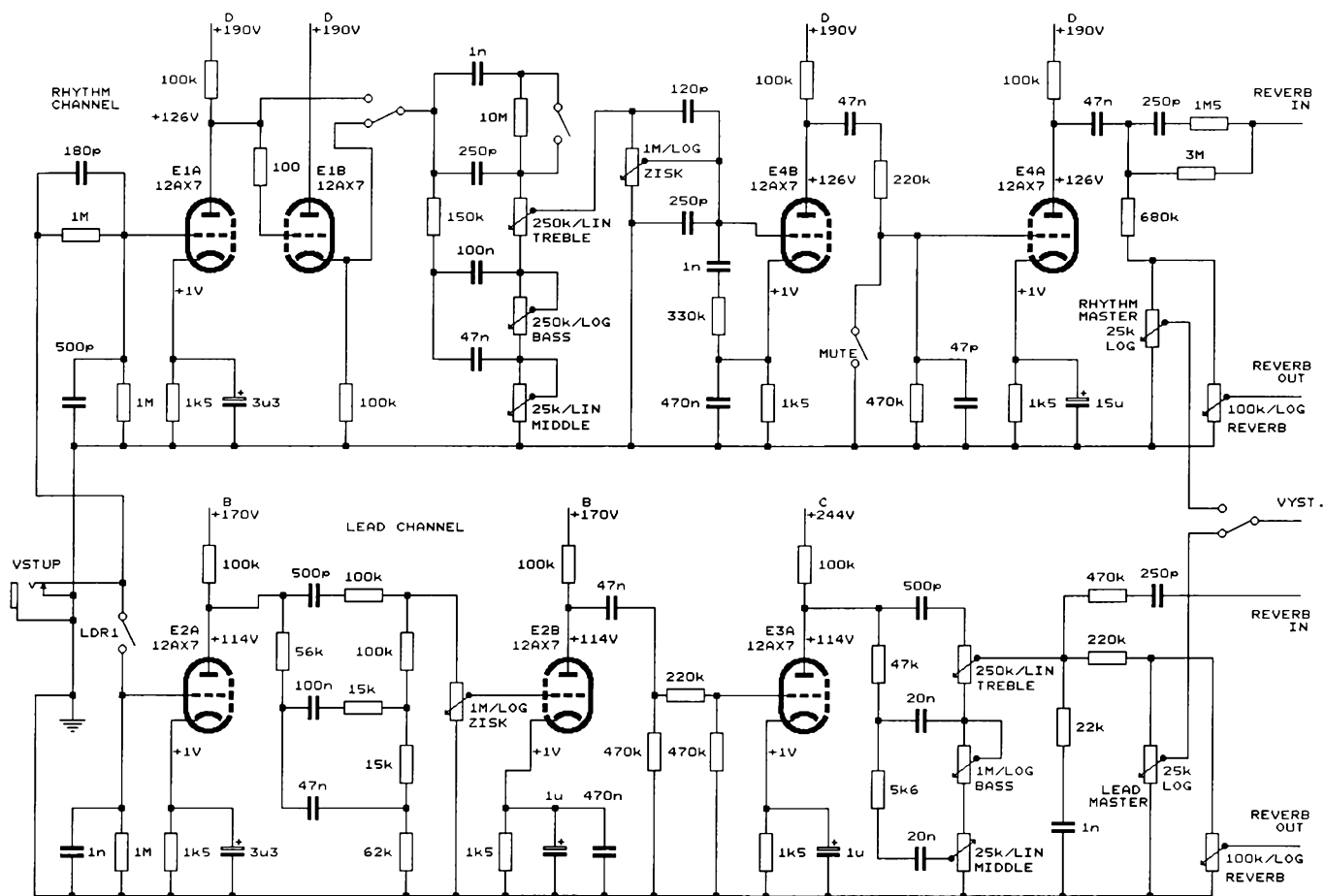
Obr. 29. Předzesilovač zesilovače MESA BOOGIE s odpojováním prvního stupně



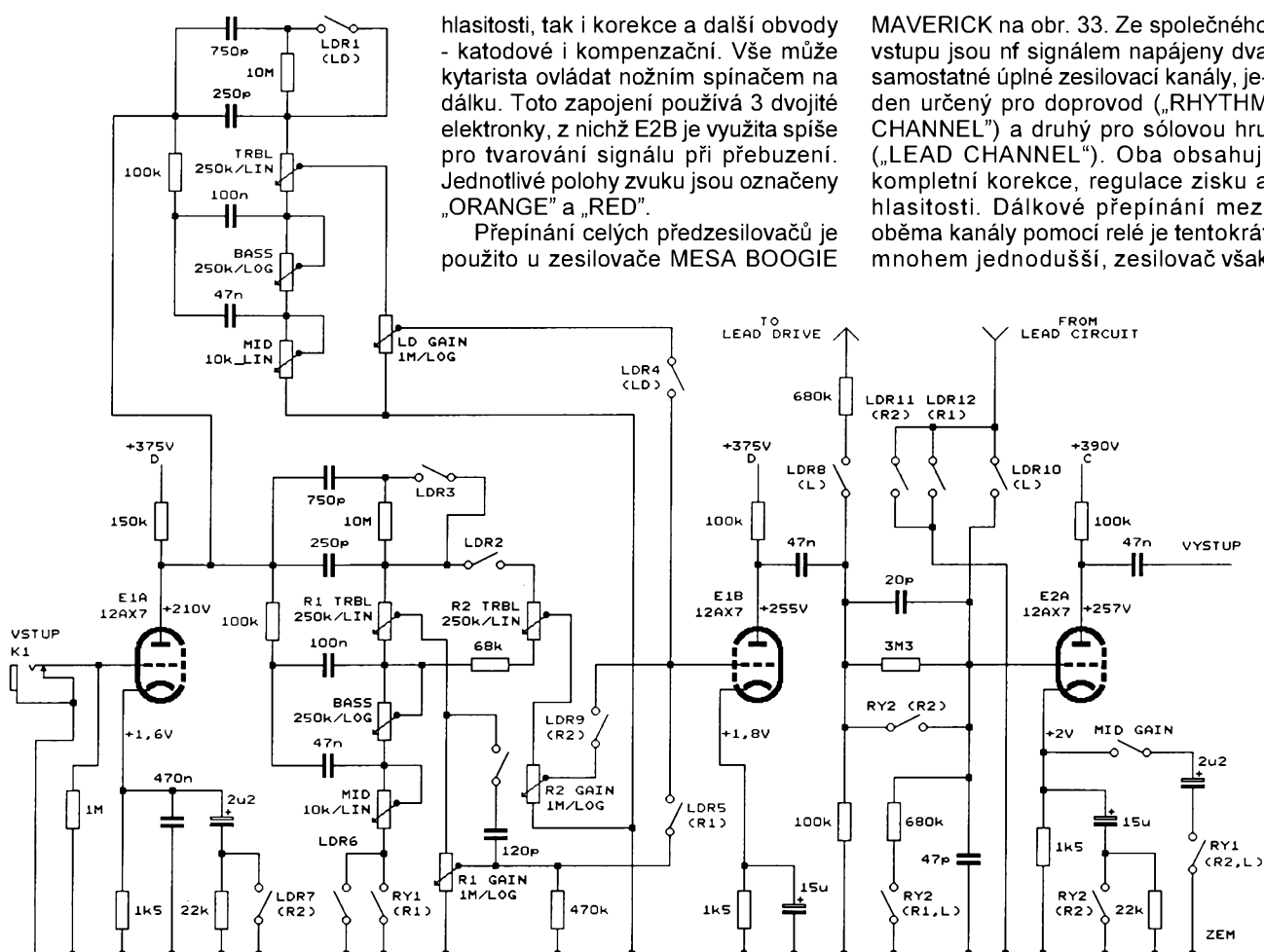
Obr. 31. Předzesilovač zesilovače
MESA BOOGIE MARK 2c se zařazo-
váním dvou stupňů pomocí relé →

**Obr. 32. Předzesilovač zesilovače
MESA BOOGIE DUAL RECTIFIER
s přepínáním zisku a korekcí
v jediném obvodu**





Obr. 33. Přepínání celých kompletních předzesilovačů v zesilovači MESA BOOGIE MAVERICK

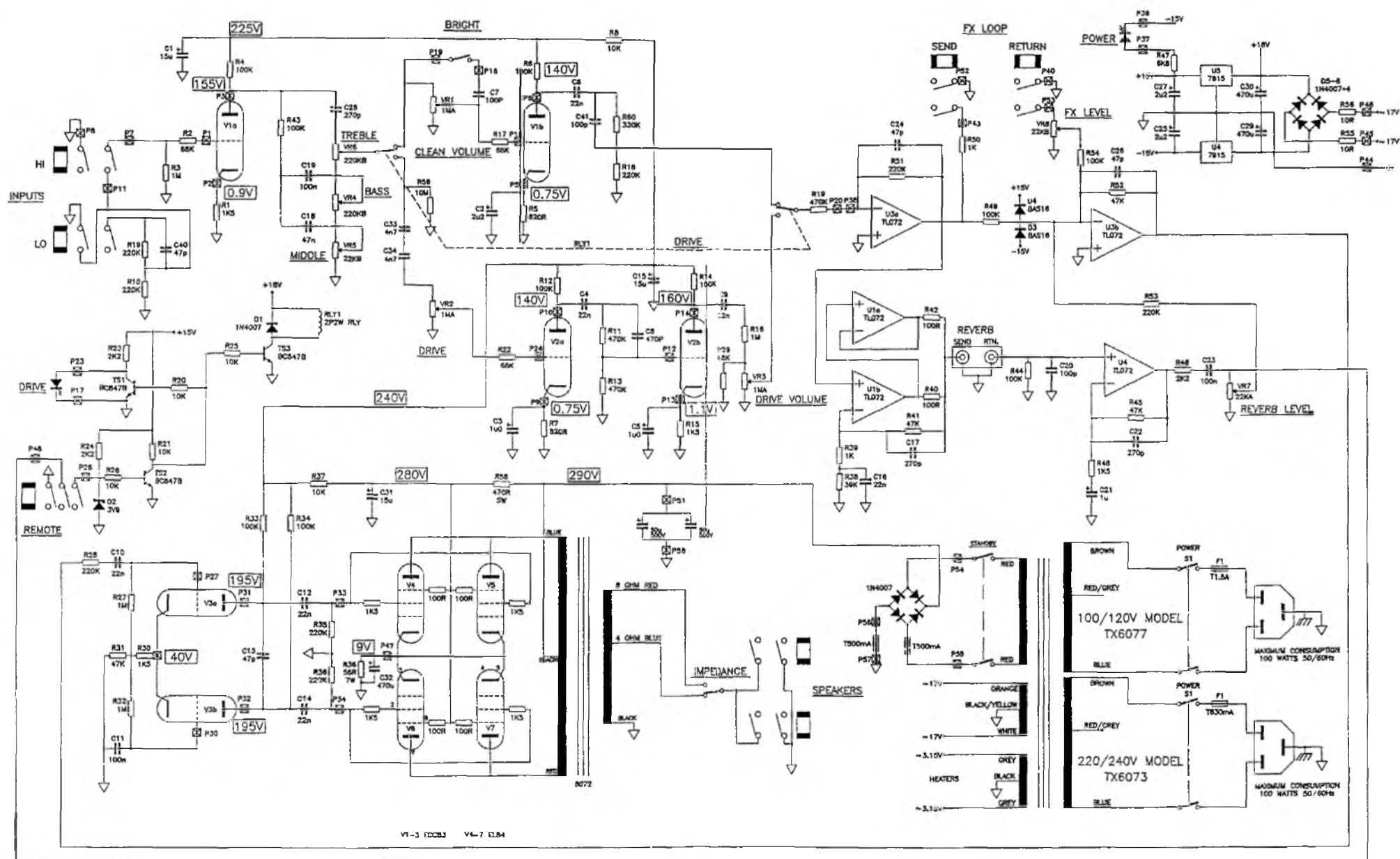


Obr. 34. Předzesilovač zesilovače MESA BOOGIE MARK 4

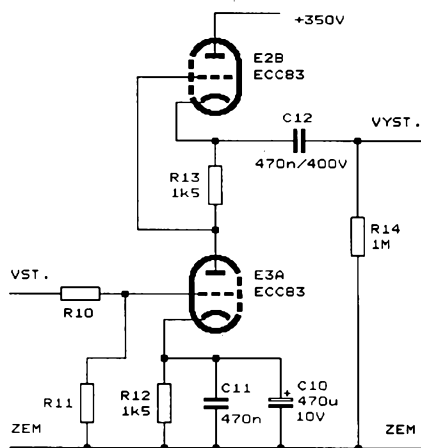
hlasitosti, tak i korekce a další obvody - katodové i kompenzační. Vše může kytarista ovládat nožním spínačem na dálku. Toto zapojení používá 3 dvojité elektronky, z nichž E2B je využita spíše pro tvarování signálu při přebuzení. Jednotlivé polohy zvuku jsou označeny „ORANGE“ a „RED“.

Přepínání celých předzesilovačů je použito u zesilovače MESA BOOGIE

MAVERICK na obr. 33. Ze společného vstupu jsou nf signálem napájeny dva samostatné úplně zesilovací kanály, jeden určený pro doprovod („RHYTHM CHANNEL“) a druhý pro sólovou hru („LEAD CHANNEL“). Oba obsahují kompletní korekce, regulace zisku a hlasitosti. Dálkové přepínání mezi oběma kanály pomocí relé je tentokrát mnohem jednodušší, zesilovač však



Obr. 35. Úplné schéma zesilovače LANEY GC30V



Obr. 36. Zesilovací stupeň s aktivní zátěží

používá 7 systémů ECC83, tedy 3 1/2 elektronky.

V kanálu „RHYTHM“ je zajímavá možnost přepínat napájení korekcí buďto z velkého vnitřního odporu anodového obvodu první elektronky nebo z katody zařaditelného katodového sledovače. Tím se zřejmě mění účinnost zařazených korekcí a barva zvuku. V korekcích lze ještě přepínat kmitočet zlomu regulace výšek. Kompenzace úbytku výšek je jen u potenciometru, dokonce jsou přidány integrační kondenzátory mezi mřížkami elektronek a zemí, které výšky spíše potlačí.

Druhý kanál „LEAD“ je zapojen odlišně - za prvním systémem elektronky je zapojen zajímavý a jistě propracovaný pasivní pevný korekční obvod, regulovatelné korekce jsou až na konci zapojení. Tím lze zvýšit efekt harmonických kmitočtů, vzniklých přebuzením stupňů při sólu. Tento jednoduchý zesilovač považuji za velice vhodný i pro amatérskou stavbu.

U předzesilovače MESA BOOGIE MARK 4 z obr. 34 jsou korekční obvody a regulátory zisku pro oba styly hry zapojeny trvale na výstup první elektronky E1A. Při přepnutí na sólo se pomocí relé zařadí mezi druhý a třetí stupeň předzesilovače další obvod pro tvarování signálu s jednou ECC83 (na obr.

34 není zakreslen, připojuje se k vývodům TO LEAD DRIVE a FROM LEAD DRIVE) a přepnou se příslušné korekční obvody.

Jednodušší verze MARK 3 nemá přepínané korekce, ale vřazuje se jen omezovací stupeň. Korekce jsou jen jedny - společné.

Na obr. 35 je celkové schéma zesilovače LANEY GC30V.

V tomto kytarovém zesilovači s jedním vstupem jsou kanály označeny jako „CLEAN“ a „DRIVE“. Cesta signálu prvním stupněm se směřuje přepínačem buďto do stupně s jedním systémem ECC83, nebo do dvoustupňového zesilovače, ve kterém vzniká tvarové žádoucí zkreslení signálu.

Oběma stupňům jsou předřazeny společné korekce, samostatné jsou regulátory hlasitosti. Ten v kanálu se zkreslením („DRIVE“) je logicky zařazen až za zesilovačem, aby bylo dosaženo přebuzení. Regulace zisku tentokrát v „čistém“ („CLEAN“) kanálu chybí a kytarista si musí pomoci potenciometrem na kytáře, v kanálu „DRIVE“ je naopak regulace před i za zesilovacím stupněm.

Zesilovač je také zajímavý tím, že signál se za prvními stupni s elektronikami dále zesiluje operačními zesilovači TL072. Koncový stupeň i jeho budič jsou opět elektronkové. Takže ani LANEY nemá strach z používání polovodičů, tato komba jsou docela populární.

Občas se můžeme setkat i se zvláštním zapojením některých stupňů elektronkových zesilovačů, jako třeba s obvodem na obr. 36, ve kterém je anodová zátěž dolní elektronky realizována horní elektronikou v zapojení se společnou anodou. Z katody horní elektronky je pak odebrán signál. Zapojení má jistě své výhody v linearitě a menším výstupním odporu, v hudební elektronice se však nepoužívá, spíše patří do třídy hi-fi.

Obvody nástrojových zesilovačů

Obvodové řešení korekčních obvodů nástrojových zesilovačů je zpravidla jiné, než korekce u zesilovačů pro do-

máci použití, a je i jiné, než u korekcí mixážních pultů.

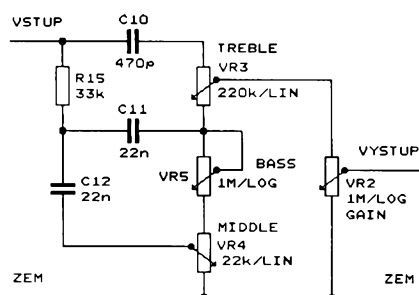
Objevují se samozřejmě různá řešení, která jsou přízřebně předpokládanému využití zesilovače. Je potřeba u korekčních stupňů respektovat generované kmitočtové spektrum a pracovat jak se základními kmitočty, tak jejich harmonickými.

U zesilovačů pro kytary se používá zavedené a osvědčené zapojení pasivních korekcí (obr. 37), které výrobci jen nepatrně modifikují, a nemá asi cenu hledat něco jiného. Modifikace se týká bodů zlomu jednotlivých korigovaných kmitočtů a místa zařazení korekčního stupně v zesilovači.

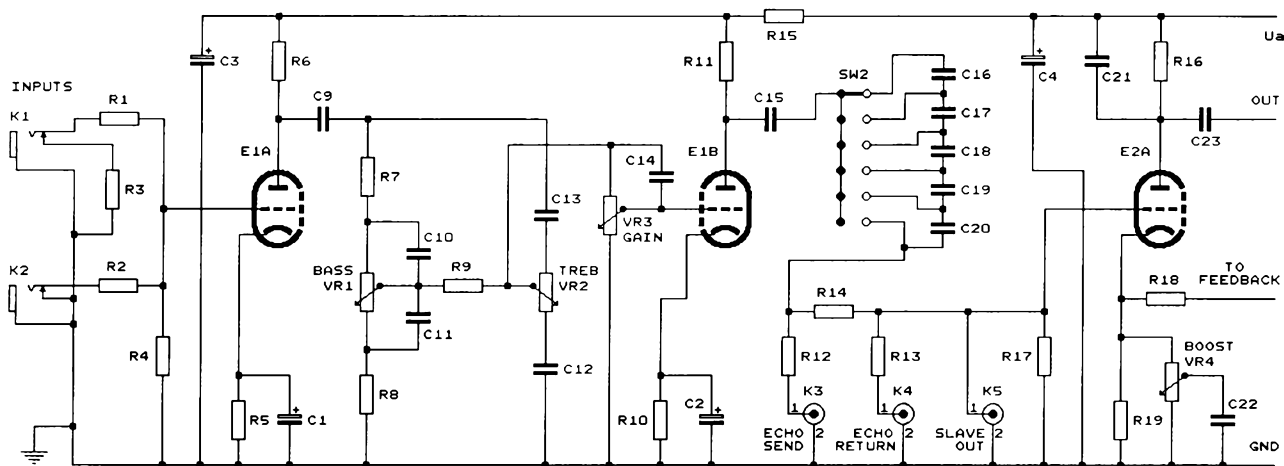
Jednotlivé modely zesilovačů mívají ještě další korekce, buďto plynulé nebo většinou skokové, zařazované spínači nebo i vícepolohovými přepínači. Tyto korekce slouží k dobarvení zvuku nástrojů a jsou typické pro daný model aparátu.

V zesilovačích pro basové kytary se používají buďto podobné obvody (ovšem se změnami kmitočty nasazení korekcí), nebo obvody s odlišným zapojením či vícepásmové ekvalizéry. Basové zesilovače bývají doplněny pro zvýraznění specifických slapové hry - v podstatě omezením určitých hlubších kmitočtů či zvýrazněním středních vyšších kmitočtů. U basových aparátů se málokdy využije potřeby nějakého tvarového zkreslení signálu, takže zesilovače tuto možnost ani nemívají.

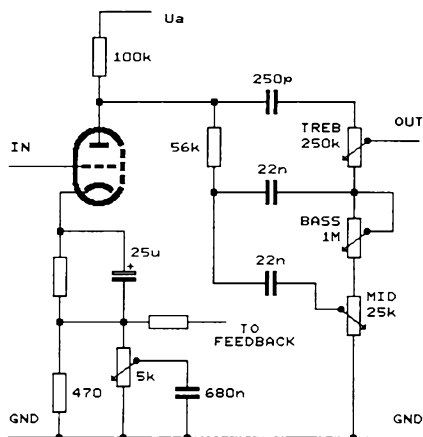
Zesilovače určené především pro klávesové nástroje jsou asi nejpodob-



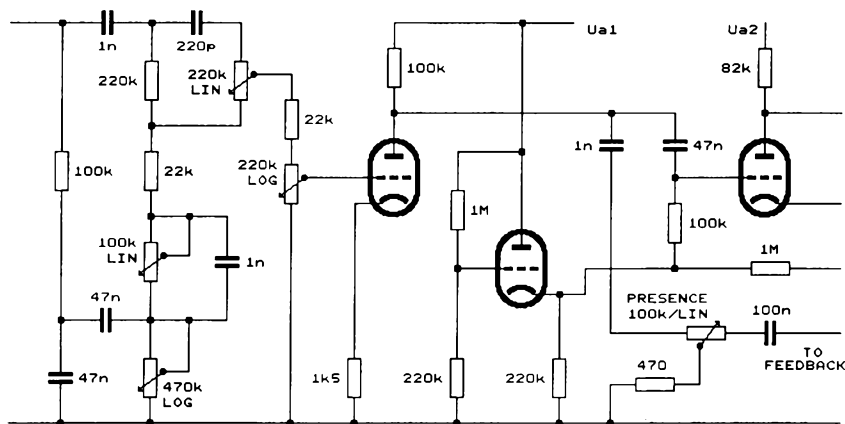
Obr. 37. Nejčastěji používané zapojení korekcí v kytarovém zesilovači



Obr. 38. Korekce zesilovače ORANGE GRAPHIC MK2



Obr. 39. Korektory v zesilovači MARSHALL 1978



Obr. 40. Korektor zesilovače HIWATT

nější „obyčejným“ Hi-Fi zesilovačům, což platí i pro jejich korekční obvody.

Pomocí korektoru, jehož schéma je na obr. 37, jsou regulovány výšky, střední kmitočty a vysoké kmitočty v pásmech, které vyhovují kytarě. Základní zapojení tohoto obvodu je ve všech kytarových zesilovačích a komech všech světových výrobců velice podobné, liší se jen hodnoty součástek, a to jen nepatrně. Dále se různé modely odlišují umístěním korekcí a způsobem jejich buzení nf signálem, které je možné buďto z anody elektronky, nebo z katodového sledovače. Těžko říci, zda buzení z katodového sledovače, které je teoreticky správnější, je i ve skutečnosti lepší „na ucho“.

Marshall např. u modelů 2203, 1959 a mnoha dalších používá buzení korekcí ze sledovače, u jiných modelů (např. 2150) zase buzení z anody. Dokonce u modelů 8080, 8100 budí korekce z operačního zesilovače.

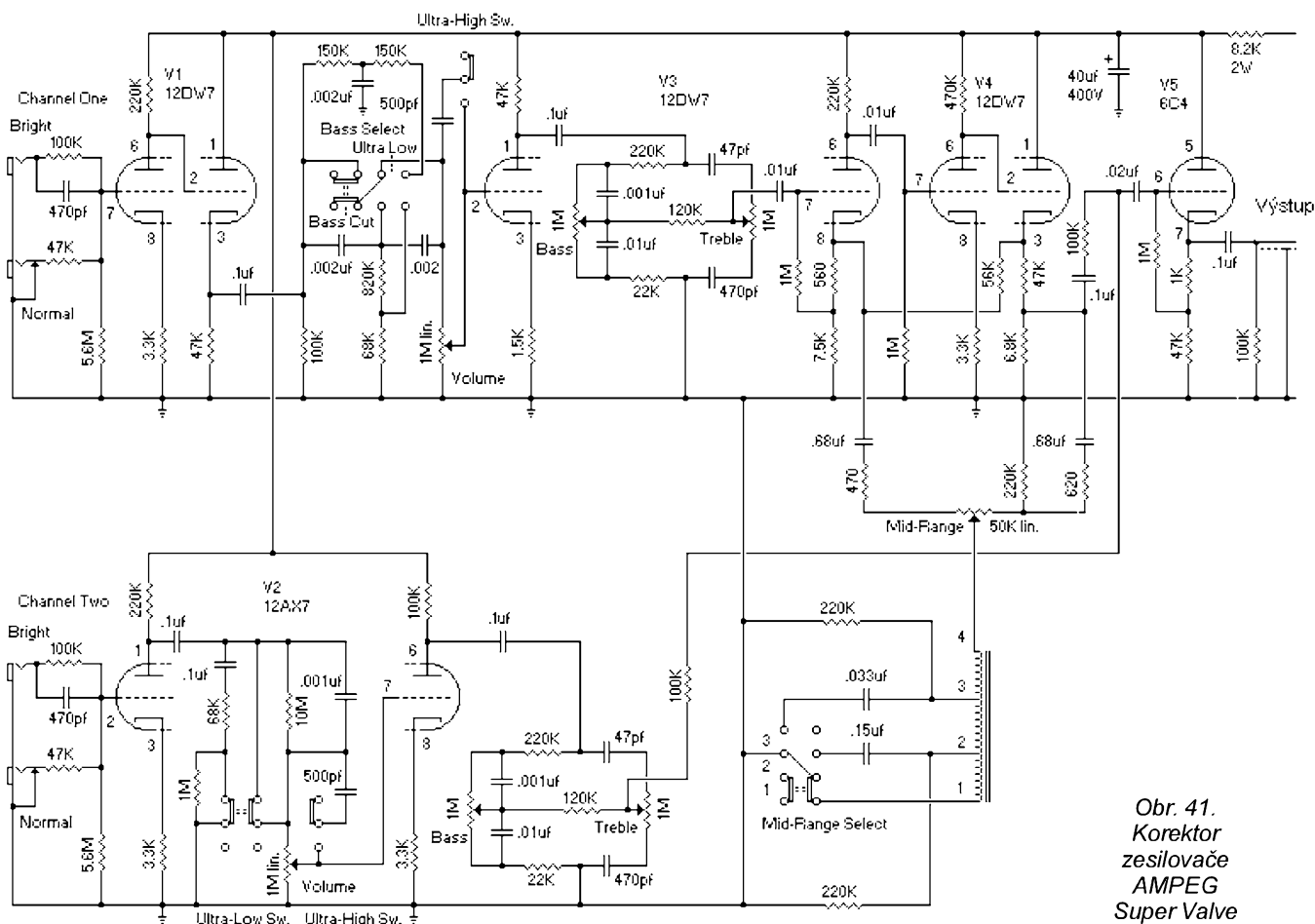
Mesa Boogie např. u modelů DUAL RECTIFIER, MARK 4 a dalších s přepínanými kanály budí korekce ze sledovače, v zesilovačích HEARTBREAKER a MAVERICK používá dokonce kombinaci obou způsobů, v každém kanálu jinou, ale většinou používá buzení korekcí z anody, jako u SUBWAY ROCKET, BLUE ANGEL apod.

Řekl bych, že buzení korekcí z anody u výrobců spíše převládá. Důvodem bude také možná potřeba využít stupeň s ECC83 jinak než jako zdánlivě „neužitečný“ sledovač.

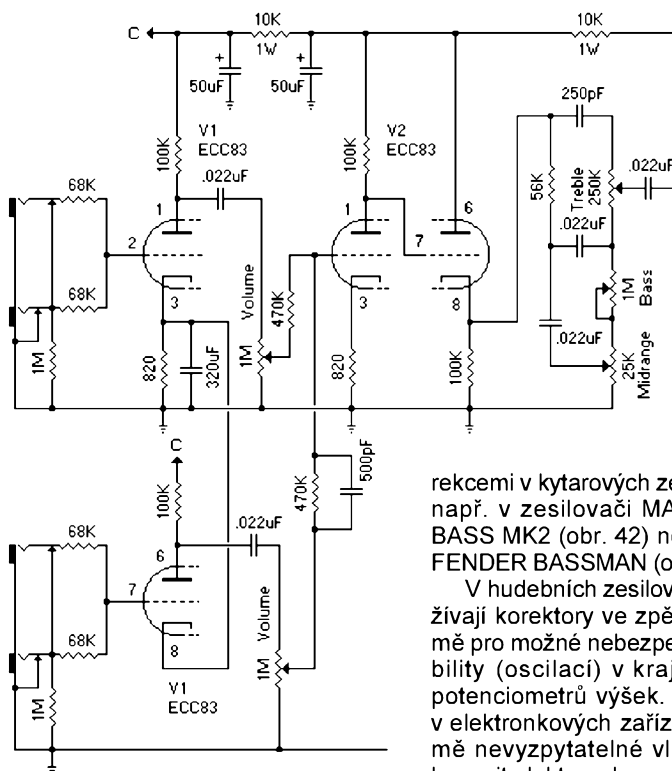
Občas se používají téměř běžné dvoupásmové pasivní korektory, jako např. u některých zesilovačů ORANGE. Použití takového korektoru ilustruje schéma části zesilovače ORANGE GRAPHIC MK2 na obr. 38, na kterém je dvoupásmový pasivní korektor zařazen mezi prvním a druhým stupněm.

Tento korektor je ovšem většinou doplněn dalším korektorem, v uvedeném zesilovači přepínatelným vazebním kondenzátorem, který je zapojen mezi druhým a třetím zesilovacím stupněm.

V zesilovači na obr. 38 je v katodě E2A ještě další korektor, označený jako „BOOST“, který umožňuje zvětšit zisk na středních a vyšších kmitočtech. Korektor je tvořen kondenzátorem s rela-



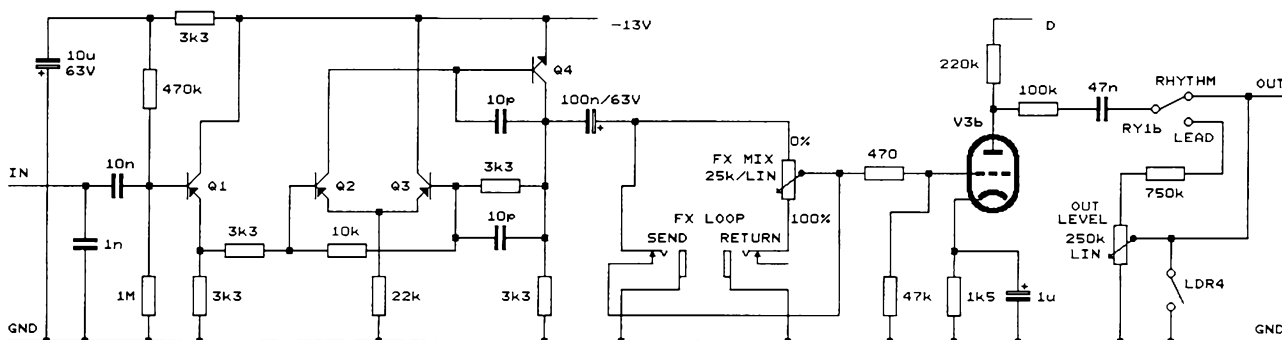
Obr. 41. Korektor zesilovače AMPEG Super Valve



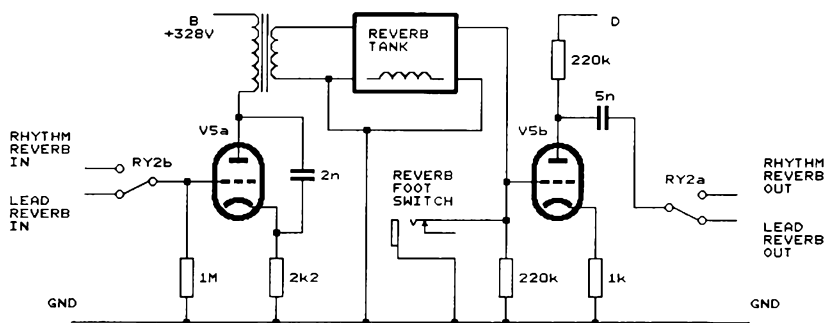
tivně malou kapacitou, který prostřednictvím potenciometru VR4 překlenuje menší či větší část katodového odporu elektronky E2A.

rekce v kytarových zesilovačích, jako např. v zesilovači MARSHALL 1986 BASS MK2 (obr. 42) nebo v zesilovači FENDER BASSMAN (obr. 43).

Efektové vstupy v předzesilovačích



Obr. 45a. Smyčka pro externí efekty v předzesilovači MESA BOOGIE MAVERICK



Obr. 45b. Pružinová dozvuková jednotka (REVERB TANK) v zesilovači MESA BOOGIE MAVERICK

Další stupně následující po předzesilovačích

U elektronkových zesilovačů následují za předzesilovačem další obvody, které umožňují smíchat nebo přepínat signály z jednotlivých předzesilovačů. Za těmito obvody je pak zařazen výkonný koncový stupeň.

Na rozhraní mezi předzesilovačem a koncovým stupněm je potřebné zajistit vyhovující úroveň signálu a impedanční přizpůsobení. Pokud je poslední součástí předzesilovače potenciometr hlasitosti, je nutné počítat s tím, že v elektronkových přístrojích je jeho odpor standardně 0,5 nebo 1 M Ω , ne méně. Je to z toho důvodu, aby předcházející stupně byly zatížené velkou impedancí - elektronky ECC83 pracují s malými proudy, mají velký vnitřní odpor a nejsou schopné vybudit dostatečné napětí na menším odporu.

Přizpůsobit elektronkový koncový stupeň k velkému odporu potenciometru na výstupu předzesilovače je jednoduché, protože koncový stupeň má velký vstupní odpor a vše je v pořádku.

Pokud se ovšem v koncovém stupni používají polovodiče, je jeho vstupní odpor relativně malý. A to jak u integrovaných koncových zesilovačů, tak i u obvyklých koncových zesilovačů s tranzistory. Standardní vstupní odpor koncového stupně s polovodiči bývá kolem 10 k Ω , a tomu by měl odpovídat i malý výstupní odpor předzesilovače.

I při konstrukci dále popsaných zesilovačů jsem se musel s problémem

vou jednotkou i malý výkonný zesilovač s výkonnější triodou (dva systémy triod ECC82 zapojené paralelně) nebo i koncovou pentodou (EL84, ECL86). Někdy výrobci zesilovačů pro tento účel neváhají použít i polovodiče - tranzistory nebo integrované obvody. Budící vinutí pružinových dozvukových jednotek mají malou vstupní impedanci, proto je při použití elektronkových zesilovačů zpravidla nutný přizpůsobovací transformátor. Výstupní napětí pružinových jednotek je malé, a proto se musí zesílit dalším předzesilovačem, než se přimíchá k neupravenému signálu v zesilovači.

Pružinové jednotky jsou náchylné na otřesy, elektrickou i mechanickou zpětnou vazbu, rušivá magnetická pole a časem se „vytahují“, nejsou-li pružiny v transportní poloze dobře aretovány.

Proto je samozřejmá snaha výrobců nahrazovat pružinové dozvukové jednotky zapojeními s polovodiči - analogovými posuvnými registry (kýblovými

brigádami), jednoúčelovými integrovanými obvody nebo mikroprocesory. Ale ne vždy je to „to ono“.

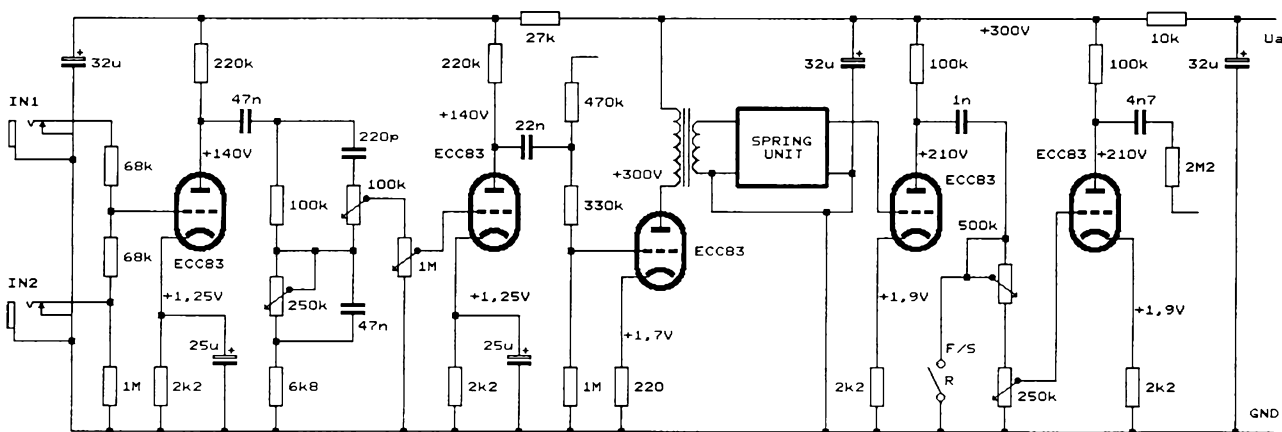
Na obr. 45a a obr. 45b je řešení efektových obvodů v zesilovači MESA BOOGIE MAVERICK.

Zesilovač je vybaven předzesilovačem pro buzení externích efektových jednotek (FX LOOP). Vstupní část tohoto předzesilovače je osazena tranzistory, výstupní část je zapojena s triodou.

V zesilovači je také vestavěna pružinová dozvuková jednotka, která je přiřaditelná doprovodnému (RHYTHM) nebo sólovému (LEAD) kanálu.

Kmitočtová charakteristika efektových kanálů je záměrně omezena, protože efekt je nejvýraznější na středních kmitočtech a okraje kmitočtového pásma mohou působit rušivě.

Jiným příkladem přístroje s vestavěnou pružinovou dozvukovou jednotkou je zesilovač ZODIAC 100 SV na obr. 46.



Obr. 46. Zesilovač ZODIAC 100 SV s vestavěnou pružinovou dozvukovou jednotkou

Obr. 47. Stíněný mikrofonní transformátor z profesionálního zařízení



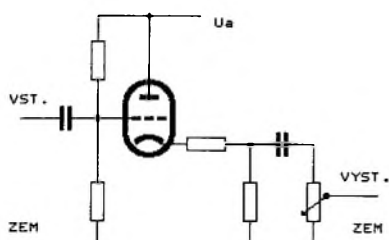
Obr. 48. Linkový transformátor s kompenzačními kondenzátory

přizpůsobení impedancí vyrovnat, a proto se tomuto zdánlivě jednoduchému problému věnuji podrobněji.

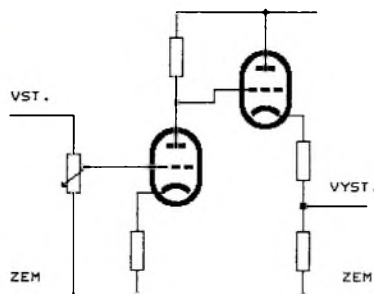
Impedance a úroveň signálu mezi elektronickým předzesilovačem a tranzistorovým koncovým stupněm lze přizpůsobit několika způsoby.

Vazba transformátorová se používá výjimečně, vzhledem k obtížnosti realizace transformátoru se vstupní impedancí kolem 1 M Ω s odpovídajícím kmitočtovým a fázovým průběhem. Takový transformátor by musel mít na primárním vinutí velice mnoho závitů, čímž se zvětšuje kapacita vinutí a rozptylová indukčnost. Kdo někdy viděl např. mikrofonní nebo linkový transformátor z profesionálního mixážního pultu, který pracuje lineárně v rozsahu od 20 Hz do 16 kHz, jistě mi dá za pravdu (obr. 47 a obr. 48). Takové transformátory mají mnoho prokládaných a různě pospojovaných vinutí, nežádoucí vlastnosti jsou kompenzovány mnoha články RC připojenými na odbočky. Samozřejmostí je dokonalé několikanásobné magnetické a elektrostatické stínění. Cena transformátorů je vysoká. Proto se využívají další způsoby navázání.

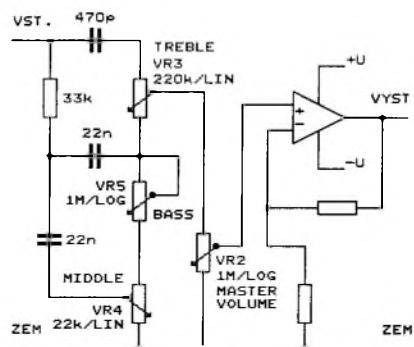
Je-li na výstupu předzesilovače katodový sledovač a dostatečný rozkmit výstupního napětí, lze k přizpůsobení použít odporovou vazbu podle obr. 49. Odpor potenciometru hlasitosti se zmenší na 10 až 25 k Ω a potenciometr



Obr. 49. Odporové přizpůsobení potenciometru hlasitosti s malým odporem (10 až 25 k Ω) ke sledovači



Obr. 50. Regulace hlasitosti před katodovým sledovačem.



Obr. 51. Operační zesilovač za potenciometrem hlasitosti

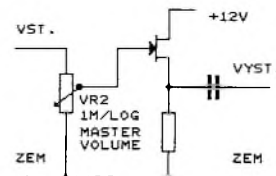
se naváže na odbočku katodového odporu sledovače. Potenciometr lze případně zapojit i jako součást děliče, ovšem pak jím protéká stejnosměrný proud. Pokud je vazební kondenzátor na vývodu běžce kvalitní, příliš to nevadí.

Katodový sledovač s ECC83 je schopen dát nezkrácené efektivní napětí 20 až 30 V na katodovém odporu 100 k Ω při napájecím napětí kolem 300 V. Pokud bude mít odporový dělič v katodě sledovače dělicí poměr 1:10, získáme efektivní napětí 2 až 3 V na výstupním odporu 10 k Ω , a to je vyhovující. Při použití výkonnější ECC82 jsou poměry mnohem příznivější a přizpůsobení není problém vůbec.

Také lze potenciometr hlasitosti zapojit před sledovač a do katody sledovače vložit pevný dělič napětí, z jehož odbočky se pak budí koncový stupeň (obr. 50).

Další možností je vložit za potenciometr hlasitosti o odporu 1 M Ω přizpůsobovací operační zesilovač s velkým vstupním odporem (obr. 51). Zapojení pracuje dokonale, výhodou je, že můžeme nastavením zisku operačního zesilovače optimalizovat napěťové poměry v zesilovači. Nevýhodou je potřeba symetrického napájecího napětí pro operační zesilovač, pokud použijeme nesymetrické napájení s umělým středem, zhoršuje se odstup. Proto je toto zapojení vhodné do zesilovačů, v nichž jsou již nějaké operační zesilovače použity, třeba v předzesilovači apod.

Napájecí napětí pro operační zesilovač (zpravidla ± 15 V) lze získat i ze symetrického vyššího napájecího napětí tranzistorového koncového stupně, ovšem vyžaduje to použití tranzistorový či integrovaný stabilizátor s předřad-



Obr. 52. Přizpůsobení koncového stupně tranzistorem J-FET

ným srážecím obvodem se Zenerovou diodou, který je schopný zpracovat relativně velké vstupní napětí (monolitické stabilizátory 7815 a 7915 mají maximální povolené vstupní napětí ± 35 V). Jednoduchý stabilizátor, který obsahuje pouze Zenerovu diodu a resistor, zpravidla nestačí pro dosažení potřebného odstupe signálu od brumu a může ohrozit i stabilitu zesilovače na nízkých kmitočtech.

Při použití operačního zesilovače je nutné respektovat jeho maximální vstupní střídavé napětí. Při symetrickém napájení ± 15 V by efektivní hodnota vstupního napětí neměla překročit velikost 5 V. Při přebuzení by se mohly zhoršit dynamické vlastnosti zesilovače v impulsch, nehlédě na tvrdý nepříjemně znějící zvuk při limitaci. Proto je vhodné optimalizovat úrovně poměry předzesilovače a případné omezení při přebuzení realizovat již v předcházejících elektronkových stupních.

Místo operačního zesilovače je také možné vložit mezi předzesilovač a koncový stupeň přizpůsobovací tranzistor J-FET podle obr. 52. Tato jednoduchá možnost je nenáročná na konstrukci i napájení. Tranzistor J-FET, třeba z řady BF245, má jen tři vývody a snadno ho lze mechanicky i elektricky „zaintegrovat“ do elektronkového předzesilovače. K napájení tohoto tranzistoru lze použít dobře vyhlazené a stabilizované napětí +12 V, odvozené ze žhavičového napětí elektronek.

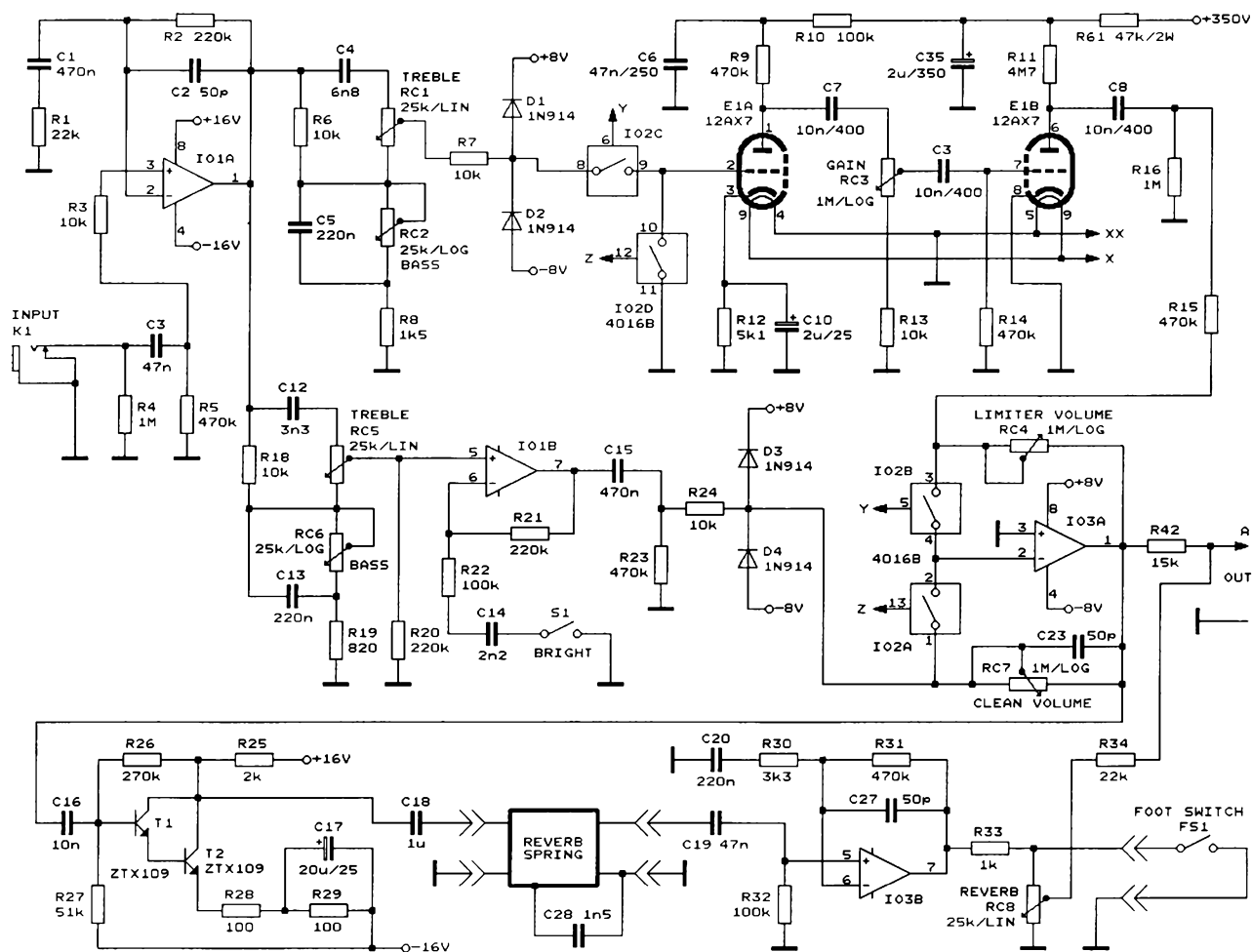
V realizovaných konstrukcích, popsaných v následujících kapitolách, jsem kromě transformátorového s úspěchem vyzkoušel všechny zde uvedené způsoby přizpůsobení.

Někdy se lze setkat s komplikovanějšími zapojeními, např. v zesilovači z komba RD-50 se používá jak integrované obvody, tak i tranzistory a elektronky. Schéma předzesilovače je na obr. 53, schéma koncového zesilovače je na obr. 60.

Elektronkové koncové stupně

Pro informaci uvedu i tuto možnost, i když naše zesilovače mají koncové stupně tranzistorové.

Pokud jsou u nejmenších zesilovačů koncové stupně jednočinné a pracují ve třídě A, je zapojení velice jednoduché. Příkladem snad nejjednoduššího řešení je zesilovač z komba GIBSON Les Paul Jr. na obr. 54. Zesilovač je doplněn vestavěnými efekty dozvukem a tremolem.



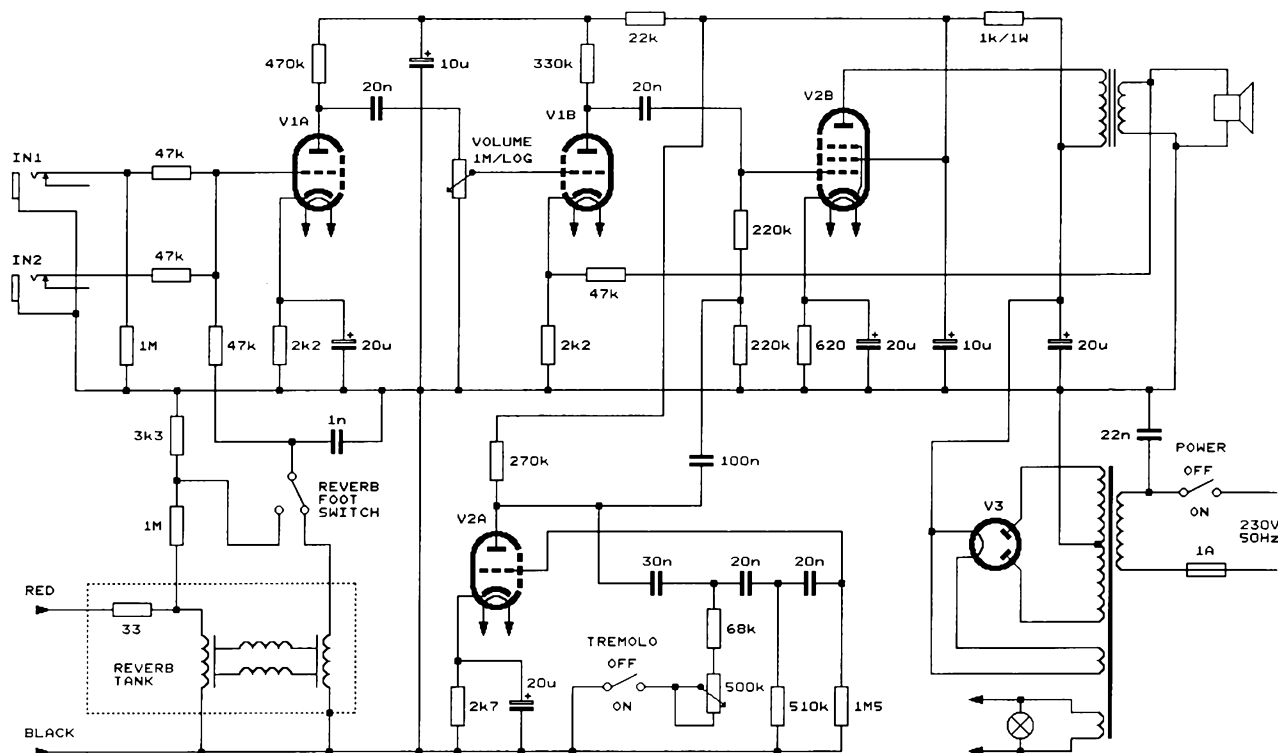
Obr. 53. Předzesilovač s korekcemi a efekty z komba RD-50

Použití jednočinného koncového stupně je ovšem výjimka a vyskytuje se jen u velmi malých komb a zesilovačů s maximálním výkonem kolem 4 W,

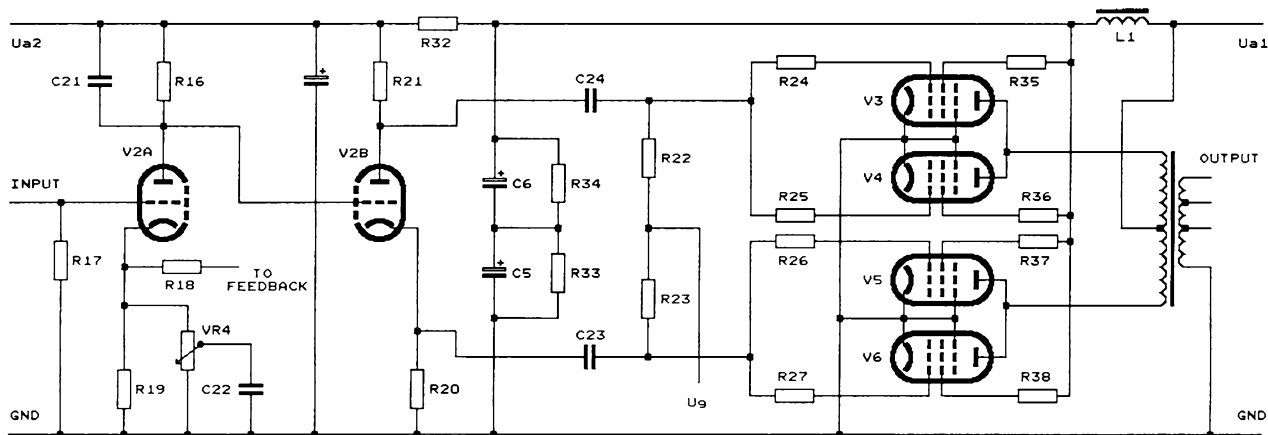
který jsou schopné poskytnout elektronky typu EL84 apod.

Daleko častější je použití dvočinného koncového stupně v protitaktním za-

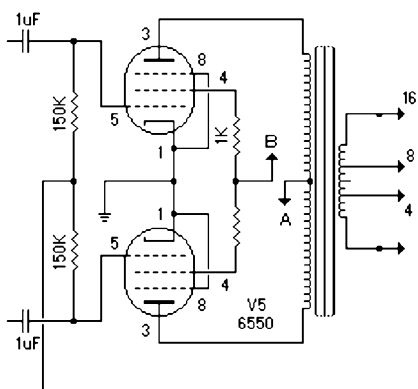
pojení (tzv. push-pull). V tomto zapojení je možné dosáhnout daleko větších výstupních výkonů, výstupní transformátor není sycen stejnosměrným proudem



Obr. 54. Zesilovač s jednočinným koncovým stupněm z komba Gibson Les Paul Jr.



Obr. 56. Koncový stupeň v zesilovači ORANGE s invertorem s rozděleným pracovním odporem elektronky V2B

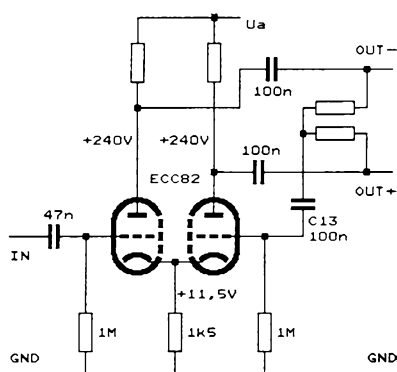


Obr. 55. Dvojčinný koncový stupeň

a účinnost zapojení je větší. Proto se s ním setkáme prakticky ve všech elektronkových zesilovačích s reálným výkonem nad 4 W (a samozřejmě ve všech zesilovačích tranzistorových).

Základní schéma dvojčinného koncového stupně je na obr. 55. Každá z elektroněk zesiluje jednu půlvlnu signálu a pracuje do poloviny vinutí výstupního transformátoru. Je proto potřeba každou elektronku budit s opačnou fází signálu. Elektronky jsou buzeny přes vazební kondenzátory o kapacitě 1 μ F.

Klidový proud elektroněk je nastaven záporným předpětím (o velikosti -10 až -50 V podle typu elektronky a třídy zesilovače), které se přivádí na řídicí mřížky přes rezistory o odporu 150 k Ω ze zvláštního zdroje.



Obr. 58. Invertor v zesilovači AC100 - JENNINGS se střídavou zpětnou vazbou z anod elektroněk invertoru

O otočení fáze o 180° se stará inverter. Jeho úkolem je dodat dva opačné signály o stejné velikosti, které mají dostatečný rozkmit pro buzení koncových elektroněk.

Zapojení invertorů se vyskytuje několik typů. K nejjednodušším patří zapojení s rozděleným pracovním odporem elektronky (obr. 56). V katodě i anodě elektronky V2B jsou pracovní rezistory (R20, R21) se shodnými odpory, pro ECC83 zpravidla o velikosti 100 k Ω . Na nich vzniká při buzení elektronky do mřížky přibližně shodné střídavé napětí. Přesné shody velikosti napětí lze dosáhnout mírně rozdílnou velikostí pracovních odporů.

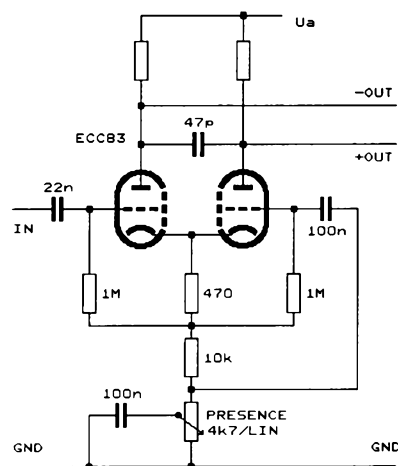
Napětí z pracovních rezistorů pak slouží bez dalšího zesílení k buzení koncových elektroněk, v případě zesilovače ORANGE na obr. 56 k buzení dvou paralelně zapojených dvojic EL34. Nutností je samozřejmě stejnosměrné oddělení katody a anody invertoru, to zajistí oddělovací kondenzátory C23 a C24. Stejnosměrné záporné předpětí U_g pro řídicí mřížky EL34 se přivádí do středu děliče R22, R23.

Výhodou tohoto typu invertoru je potřeba pouze jednoho triodového systému elektronky, nevýhodou jsou nesymetrické vlastnosti zapojení - nestejné výstupní napětí na katodě a anodě a jeho tvarové zkreslení při přebuzení. Také

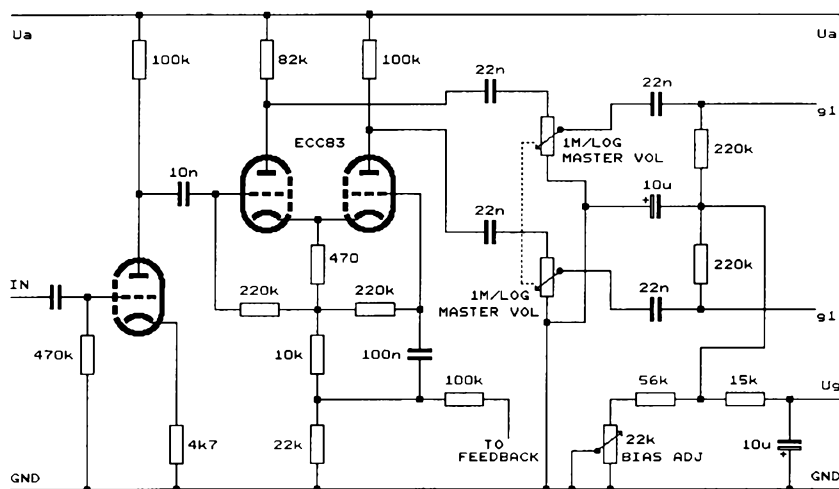
nemusi někdy dostávat dosažitelná velikost výstupního napětí invertoru pro buzení „tvrdších“ elektroněk v triodovém zapojení.

Proto se daleko častěji používají zapojení invertorů s dvěma triodami se společným katodovým odporem. Zapojení jsou si velice podobná (obr. 57, obr. 58).

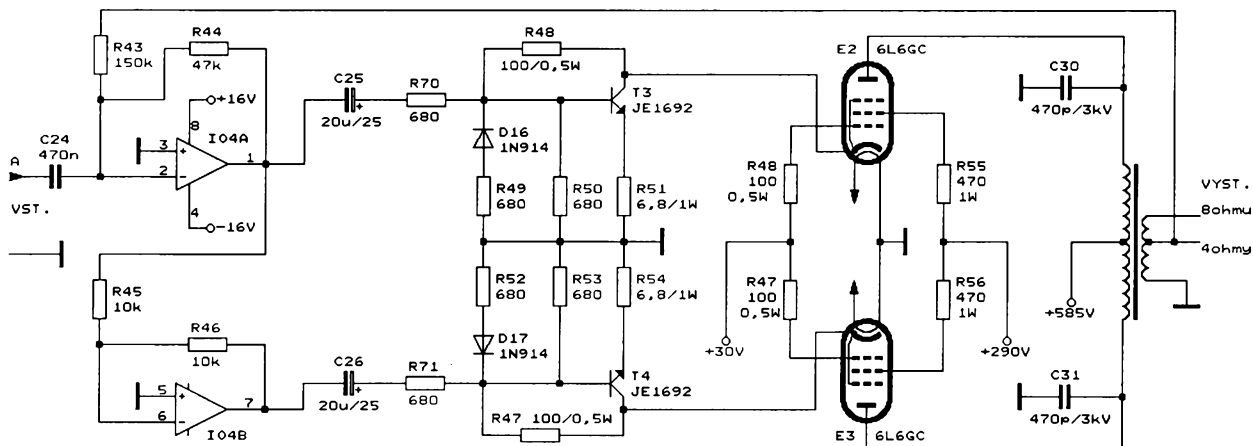
Signálem z předzesilovače je buzení mřížka první triody. Na její anodě se objeví zesílené napětí s opačnou fází,



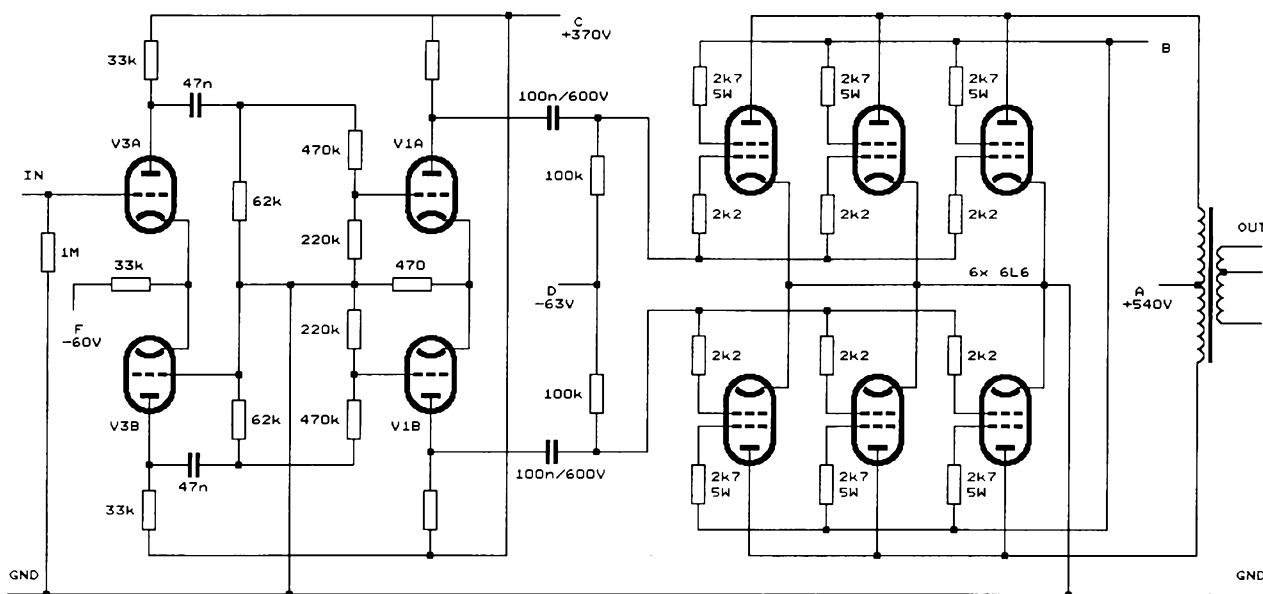
Obr. 57. Invertor se dvěma triodami v zesilovači DEA 70 LONDON CITY s regulací PRESENCE



Obr. 59. Marshall JCM800 - 4140 s regulací hlasitosti za invertorem



Obr. 60. Invertor s integrovanými obvody



Obr. 61. Zesilovač MESA BOOGIE BASS 400

než má vstupní napětí, na katodě je na nízké impedanci napětí se stejnou velikostí (přibližně) a fází jako na vstupu. Druhá elektronka je tímto napětím buzena do katody, protože katody obou triod jsou spojené. Mřížka druhé elektronky je střídavě uzemněná, takže na anodě druhé triody se objeví zesílené napětí, které má stejnou fázi jako vstupní napětí. Napětí na anodách obou triod jsou tedy v protifázi.

Často se využívá možnosti zavést do „nevyužitě“ mřížky druhé elektronky invertoru zápornou zpětnou vazbu z výstupu transformátoru. Tento způsob je použit u mnoha zesilovačů všech výrobců.

Další možností je zavést do této mřížky rozdíl napětí z anod invertoru a kompenzovat tak jeho případnou nesymetrii. Dobře je to vidět u zesilovače AC100 - JENNINGS na obr. 58.

Někdy se dokonce hlavní regulátor hlasitosti (MASTER VOLUME) zapojuje až za invertor, jako je tomu u legendární série Marshall JCM-800 na obr. 59. Pak je samozřejmě nutné použít potenciometr dvojitý, zde 2x 1MΩ/LOG. Má to výhodu asi především v tom (mimo maximálního odstupu signálu při staže-

né hlasitosti), že lze před regulátorem hlasitosti přebudit i invertor a dosáhnout zajímavějšího zvuku kytary.

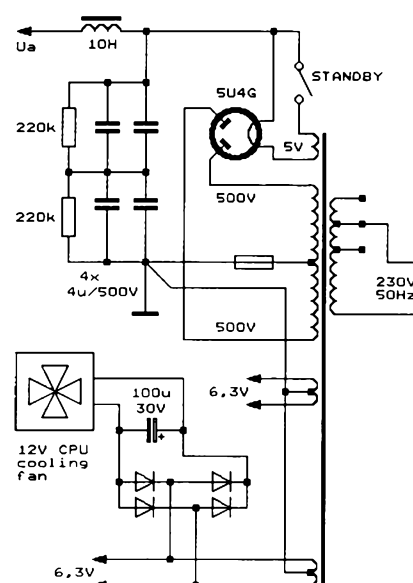
Někdy se za invertor zařazuje ještě další zesilovací stupeň, jako např. u invertoru realizovaného s integrovanými obvody podle obr.60. Zde jsou ovšem koncové elektronky buzeny nízkaimpedančně do katody a jako zesilovače jsou použity tranzistory.

Zesilovací stupeň s ECC83V (V1A, V1B) je zařazen v obou větvích za běžným katodově vázaným invertorem s ECC83 i v mohutném zesilovači MESA BOOGIE BASS 400 se šesti elektronkami 6L6 v koncovém stupni s napětím 540 V na anodách.

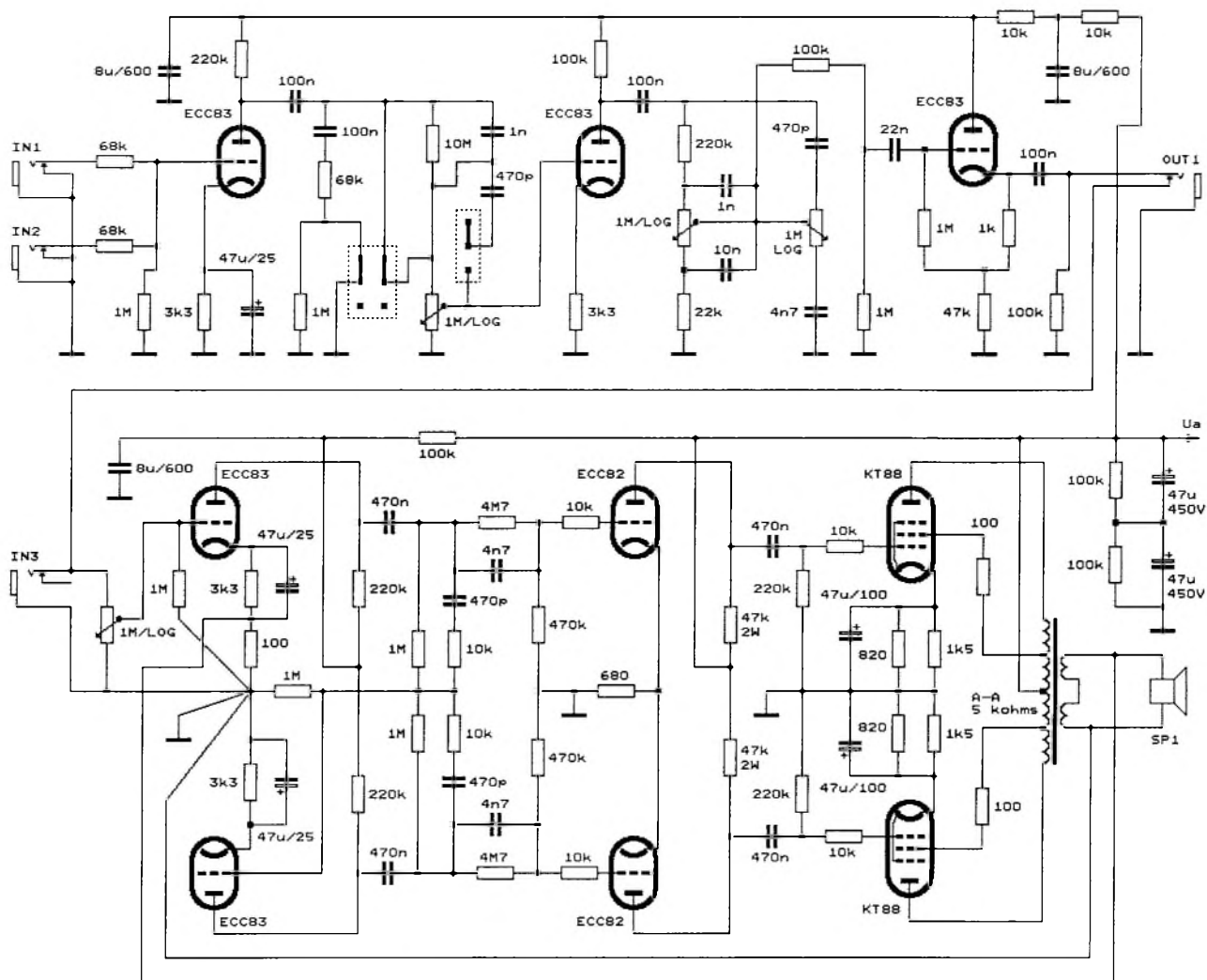
S podobným řešením se lze setkat nejen u velmi výkonných zesilovačů, ale i u menších zesilovačů, ve kterých jsou použity koncové elektronky s menší strmostí nebo pracují v méně obvyklém zapojení.

Např. elektronky KT88 zesilovače z obr. 62 a obr. 63 zřejmě vyžadují větší budící střídavé napětí, než by byl schopen dodat samotný invertor. Zesilovač je totiž zapojen jako ultralinear, tj. druhé mřížky koncových pentod jsou připojeny na odbočky výstupního

transformátoru. Takto zavedená záporná zpětná vazba sice zlepšuje linearitu, avšak zmenšuje napěťové zesílení koncových elektronek.



Obr. 62. Napájecí zdroj zesilovače BASS 88-50



Obr. 63. Zesilovač BASS 88-50 s koncovým stupněm v tzv. ultralinearním zapojení

Praktická stavba předzesilovačů

Předzesilovač s 2x ECC83

Nejprve popíši praktickou stavbu předzesilovače se dvěma ECC83 a třípásmovými korekcemi, který je přizpůsoben koncovému stupni tranzistorem J-FET (obr. 64).

Zapojení vychází z osvědčených obvodů, které používají snad všichni výrobci zesilovačů po desítky let.

Schéma předzesilovače je na obr. 65. Předzesilovač má dva vstupy (INPUT 1 a INPUT 2), určené především pro kytary a další nástroje, je však možné je použít i pro mikrofon. Oba vstupy mohou být využity současně, korekce jsou však společné. Pro jednoduchost jsou na vstupech vynechány obvyklé odporové děliče spínané kontakty v konektorech typu jack. Děliče lze samozřejmě doplnit, ale neshledal jsem to jako potřebné. Signály ze vstupů se přivádějí přes malé sériové ochranné rezistory R2 a R4 na mřížky triod E1A a E1B typu ECC83.

Kmitočtová kompenzace integračního článku tvořeného sériovým rezistorem a vstupní kapacitou elektronky není

nutná, tento článek RC naopak přispívá k potlačení vysokých rušivých kmitočtů nad akustickým pásmem.

Elektronka ECC83 pracuje v základním zapojení. Rozdílné hodnoty katodových rezistorů a kondenzátorů přispívají ke zdvihu vyšších kmitočtů u horního vstupu.

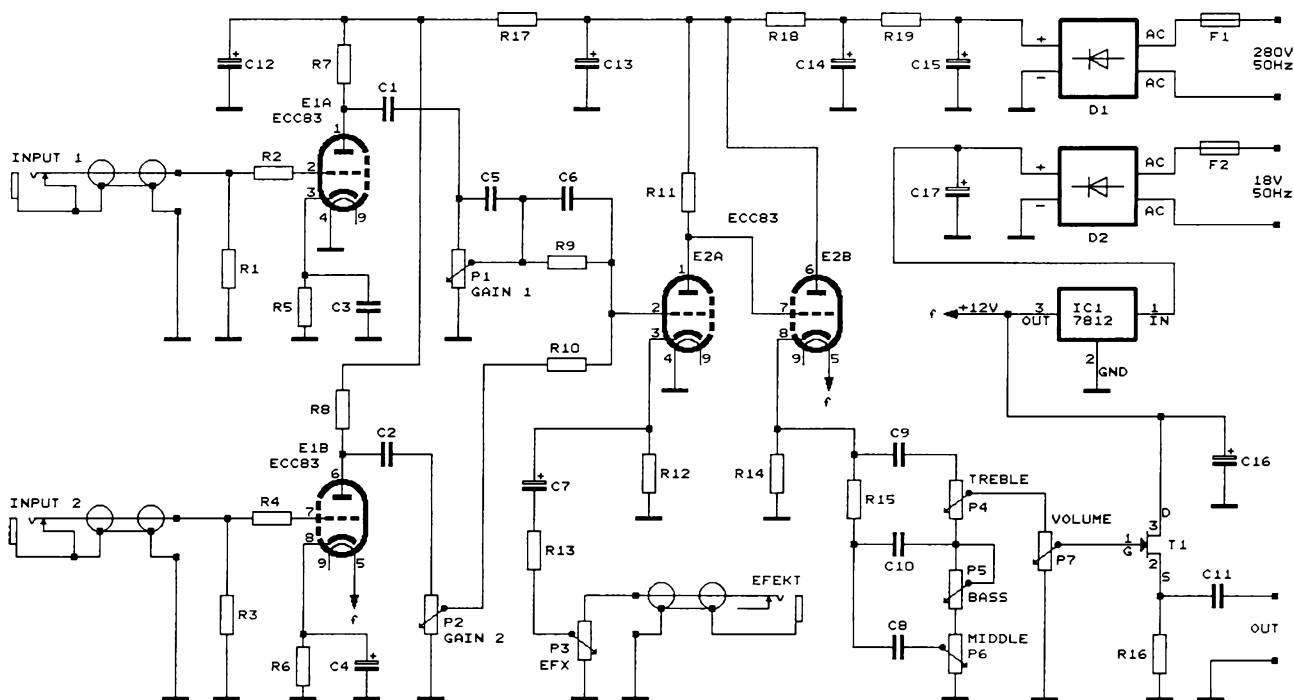
Z anod E1A a E1B se signály přes vazební kondenzátory s rozdílnými ka-

pacitami ($C1 = 22 \text{ nF}$ a $C2 = 68 \text{ nF}$) přivádějí na potenciometry P1 a P2 (GAIN 1 a GAIN 2), kterými se nastavuje zisk a vybuzení následujících stupňů.

Při větším vytočení těchto potenciometrů je i při použití běžného kytarového snímače signál v dalších stupních již omezován, což vytváří žádoucí „sustain“ u tónu kytary. Rozhodně se však nejedná o žádné pře-



Obr. 64. Předzesilovač s 2x ECC83



Obr. 65. Schéma předzesilovače s 2x ECC83

hnaně ostré omezení, sinusovka se jen příjemně zakulacuje. První stupně (před potenciometry GAIN) snesou vstupní napětovou úroveň kolem 500 mV bez výrazného zkreslení.

Signály z běžců potenciometrů jsou smíchány na rezistorech R9 a R10. K rezistoru R9 je paralelně připojen kondenzátor C6, který zajišťuje zdvih na vyšších kmitočtech, závislý i na poloze běžce potenciometru druhého vstupu. Navíc potenciometr P1 má živý vývod a běžec propojen kondenzátorem C5 s malou kapacitou, který se stará o další zdvih výšek u horního vstupu. Výsledkem je na výšky bohatší signál z horního vstupu a „temnější“ signál z dolního vstupu.

Konstruktor ovšem může kapacity kondenzátorů snadno změnit nebo kompenzace úplně vynechat a oba první stupně zapojit stejně. Pak se oba chovají totožně, výsledkem je ovšem přirozený pokles výšek u obou vstupů.

Smíchaný signál z prvních stupňů se přivádí na další elektronku ECC83. Její první systém E2A je opět zapojen jako běžný zesilovací stupeň, druhý systém E2B je stejnosměrně navázaný katodový sledovač. Taková dvojice se objevuje v zesilovačích velice často.

Z katody sledovače E2B je buzen pasivní třípásmový korektor v obvykle používaném zapojení pro nástroje. Potenciometrem P4 se ovládají výšky (TREBLE), potenciometrem P5 basy (BASS) a potenciometrem P6 středy (MIDDLE).

Za korektorem je už potenciometr pro ovládání hlasitosti (VOLUME) s obvyklým odporem 1 MΩ/LOG, kterým není korekční obvod příliš zatížen.

Impedanční přizpůsobení za potenciometrem (ke koncovému zesilovači) zajišťuje tranzistor J-FET typu BF245B

zapojený jako sledovač, který je napájen napětím 12 V. Přebuditelnost tohoto stupně je i při relativně malém napájecím napětí 12 V vyhovující, protože je zapojen až za regulátor hlasitosti, a požadované efektivní výstupní napětí pro koncový zesilovač je asi 1,5 V.

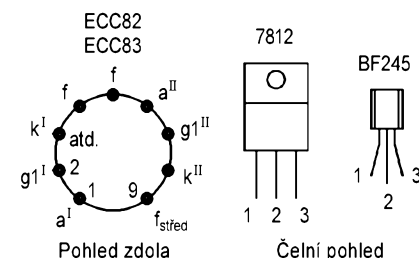
Výstupní napětí se přivádí na pájecí body na výstupu zesilovače a odtud na koncový tranzistorový stupeň.

Z neblokované katody triody E2A je přes potenciometr P3 (označený jako EFX) vyveden signál na výstup EFEKT pro vnější efekťová zařízení a další využití. Výstup EFEKT však může vtipně sloužit i jako vstup s linkovou úrovní, proto je před potenciometrem zařazen oddělovací rezistor R13, který zvětšuje impedance tohoto vstupu/výstupu a přizpůsobuje úrovně signálů.

Součástí předzesilovače jsou i napájecí obvody. Anodové napětí se získává dvojcestným usměrněním napětí ze zvláštního vinutí (280 V/30 mA) toroidního síťového transformátoru malým můstkovým usměrňovačem D1 (1 A/400 V~ s drátovými vývody). Usměrněné napětí je dostatečně filtrováno řetězcem článků RC s rezistory R17 až R19 a kondenzátory C12 až C15 o kapacitách 22 až 47 μF/400 V.

Upozorňuji raději znovu - pozor při práci s napětím kolem 400 V a nabitými kondenzátory!

Stejněsměrné žhavicí napětí 12 V je získáváno opět dvojcestným usměrněním napětí z transformátoru (z vinutí 18 V/0,5 A), je filtrováno kondenzátorem C17 o kapacitě 2000 μF a stabilizováno integrovaným stabilizátorem IC1 typu μA7812 (12 V/1 A). Žhavicí vlákna v každé ECC83 jsou zapojena do série a vždy jeden krajní vývod je uzemněn. Napětím 12 V je napájen i přizpůsobovací stupeň s J-FET T1



a kontrolka LED (na obr. 65 není nakreslena).

Usměrňovač a stabilizátor žhavicího napětí lze umístit přímo do jednotky předzesilovače, je však třeba dát pozor na správné zemnění. Stabilizátor IC1 při vstupním napětí kolem 24 V a odběru proudu 300 mA už potřebuje chlazení.

Seznam součástek

R1, R3	1 MΩ/0,5 W
R2, R4	68 kΩ/0,5 W
R5, R6, R12	820 Ω/0,5 W
R7, R8,	
R11, R14	100 kΩ/0,5 W
R9, R10	330 kΩ/0,5 W
R13, R17,	
R18, R19	10 kΩ/2 W, metaloxidový
R15	33 kΩ/0,5 W
R16	asi 470Ω/0,5 W, nastavit na nejlepší tvar signálu podle použitého T1
P1, P2,	
P5, P7	1 MΩ/log., potenciometr
P3	25 kΩ/log., potenciometr
P4	250 kΩ/lin., potenciometr
P6	25 kΩ/lin., potenciometr
C1, C8, C10	22 nF/400 V, fóliový
C2	68 nF/400 V, fóliový
C3	470 nF/63 V, fóliový
C4, C7, C16	47 μF/16 V, tantalový kapkový
C5	47 pF/400 V, keram.
C6, C9	470 pF/400 V, keram.
C12, C13,	
C14, C15	47 μF/400 V, elektrolyt.

C17	2200 μ F/25 V, elektrolyt.
D1, D2	usměrňovací můstek 1 A/400 V~
T1	J-FET BF245A-C
IC1	μ A7812
E1, E2	ECC83

Mechanická konstrukce

Předzesilovač jsem řešil jako univerzální modul. Osvědčila se stavba na kostře z hliníkového profilu U o rozměrech 50x25 mm s tloušťkou stěny 2 mm, který je dlouhý 280 mm (obr. 66 a obr. 69).

Profil je umístěn „dnem vzhůru“, elektronky a velké elektrolytické kondenzátory jsou umístěny vně profilu, ostatní součástky jsou uvnitř profilu. Potenciometry nese pomocný panel, který je přišroubován k profilu U.

Modul předzesilovače je umístěn do skříně RACK 2U zesilovače do prostoru mezi subpanelem a předním panelem. Pomocný panel modulu je opřen o přední panel skříně a hřídele potenciometrů jsou vyvedeny dírami v předním panelu. Modul je upevněn tak, že profil U je přišroubován dvěma šrouby M3 k subpanelu. Na šrouby jsou navlečené distanční sloupky, které vyplňují volný prostor mezi profilem a subpanelem (viz obr. 66).

Pomocný panel může být vyroben z kuprextu tloušťky 1,5 až 2 mm jednostranně nebo oboustranně plátovaného mědi, popř. z hliníkového plechu tloušťky asi 1,2 mm. Výkres vrtání pomocného panelu je na obr. 67. K vývodům potenciometrů jsou připájené dráty, které procházejí děrami do vnitřku profilu U a jsou připojené do příslušných bodů zesilovače. Tyto díry nejsou na obr. 68 znázorněny.

Profil U je po oříznutí na patřičnou délku vyvrtán. Výkres vrtání nejdůležitějších děr do profilu U je na obr. 68. Další díry (pro upevnění izolovaných pájecích bodů, některých součástek, pomocného panelu atd.) vyvrtáme podle potřeby.

Nejvíce pracné jsou díry pro keramické objímky elektronek. Pro vrtání jsem použil velký vrták do kovu, u kterého jsem kuželovou „Morse“ stopku upravil na válcovou o průměru 14 mm a vrtal malými otáčkami ve stojanové vrtačce. Hrubě vyvrtaný otvor se dokončí kuželovým výhrubníkem.

Nf výstup a vstupy napájecích napětí z transformátoru jsou vyvedeny na svorkovnici na konci zesilovače. Vyrobil jsem ji nanýtováním pájecích oček na pásek skelného laminátu - kuprextitu bez měděné fólie. Svorkovnice je přišroubována na profil U zevně (shora) a je podložena páskem izolantu. Nepodceňujte izolaci a izolační vzdálenosti!

Filtreační elektrolytické kondenzátory 47 μ F/400V jsou dosti rozměrné a nevešly by se dovnitř profilu U. Proto jsou umístěny podobně jako elektronky na výšku na vnější straně profilu. Pro jejich radiální vývody jsou v profilu vyvrtány vždy dvojice děr o průměru 3 mm s při-



Obr. 66. Mechanická konstrukce předzesilovače (pohled zespodu)

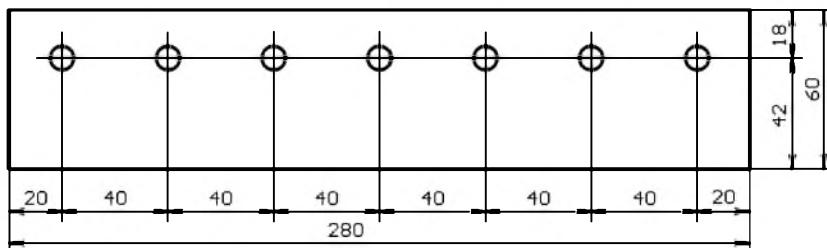
slušnou roztečí podle použitých kondenzátorů (5 nebo 7,5 mm). Na vývody kondenzátorů jsou nasunuty dvě vrstvy bužírky - vnitřní teflonová a přes ní smršťovací. Pak jsou vývody připájené do příslušných bodů zapojení. Záporné vývody jsou uzemněné pomocí pájecích oček, upevněných pod šrouby objímek elektronek. Pro kladné vývody jsou vytvořené izolované pájecí body, které pak slouží k připojení i dalších součástek - filtračních a anodových rezistorů.

Jako pájecí body jsem použil kdysi známé bakelitové úhelničky se zalisovanými pájecími očky, které jsem přišrouboval v potřebných místech k profilu zevnitř. Pokud neseženete tyto úhelničky, lze pájecí body realizovat jednoduše i svépomocí. Ve čtverečku nebo kolečku o průměru asi 6 mm jednostranně plátovaného kuprextitu vyvr-

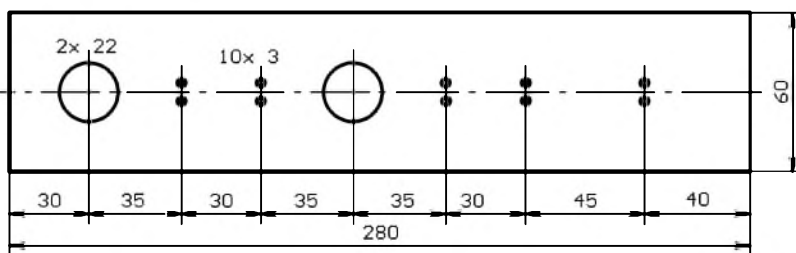
tejte díru o průměru asi 0,8 mm, a z izolačního materiálu o tloušťce asi 1,5 mm vyrobte o něco větší podložku (o průměru asi 8 mm) s dírou 3 mm. Pak podložku a kuprextitovou destičku nasuňte na kladný vývod kondenzátoru a po přitlačení k profilu připájejte vývod. Vývod musí být spolehlivě izolován, je na něm napětí až +400 V proti kostře. Bužírky na kladných vývodech se musí zkrátit tak, aby po dotažení kondenzátoru sloužily jako průchodky.

Pod kondenzátory je nezbytné před montáží kápnout trochu lepidla - silikonového nebo vhodného dvousložkového - a tím fixovat kondenzátory proti otřesům.

Zapojovat zemní vývody součástek do jednoho bodu nebo na zvláštní vodič uzemněný v jednom bodě je sice správné, ale není to u takto konstruovaného zesilovače nutné. Nejistil jsem rozdíl



Obr. 67. Rozměry a vrtání pomocného panelu předzesilovače s 2x ECC83 - pohled na lícovou stranu (bez měřítka). Průměr děr podle rozměru závitů použitých potenciometrů. Zleva doprava jsou umístěny potenciometry GAIN 1, GAIN 2, TREBLE, MIDDLE, BASS, EFX a VOLUME



Obr. 68. Rozměry a vrtání profilu U předzesilovače s 2x ECC83 (bez měřítka). Díry o průměru 22 mm jsou pro elektronky, díry o průměru 3 mm jsou pro vývody kondenzátorů C12 až C15 (zleva doprava). Rozteč děr o průměru 3 mm určíte podle použitých kondenzátorů

v brumu mezi takovou konstrukcí a průběžným zemněním na hliníkový profil v odpovídajících bodech. Pouze žhavicí napětí vedte dvěma vodiči, z nichž jeden je dobré uzemnit na záporný vývod kondenzátoru C17, který je uzemněn na chladič plošku stabilizátoru IC1 (chladič ploška je přišroubována k profilu šroubem M3). Tamtéž uzemněte i záporný vývod usměrňovacího můstku žhavení.

Při stavbě se snadno obejdeme bez plošných spojů, stavba přístrojů s elektronkami je převážně záležitostí mechanickou. Součástek je málo a při použití dnešních miniaturních typů je místa dost. Jako pájecí body slouží především vývody elektronkových objímek. Nebojte se, součástky na ně připájené jsou malé, lehké a vývody nejsou nikterak namáhány. Vývody elektronek jsou číslovány od jedné do devíti ve směru otáčení hodinových ručiček při pohledu na elektronku zespoda, tj. na pájecí očka objímky. Vývod č. 1 je první ve směru otáčení hodinových ručiček od mezery mezi vývody. Větší filtrační rezistory o výkonu 2 W jsou upevněny mezi pájecí body na kladných vývodech elektrolytických kondenzátorů. Uspořádání součástek a pájecích bodů je zřejmé z obr. 66.

Vývody potenciometrů jsou vlastně jediné drátové spoje. Některé vycházejí trochu delší, proto je nutné je stínit i uvnitř profilu. Všechny spoje zapojují vodičem s teflonovou izolací a na vodiče, které se mají stínit, nasunují hustou stříbřenou stínicí punčošku z koaxiálního kabelu. Stíněné vodiče se pak vedou položené na stěnu profilu, na kterou jsou přitlačovány vhodně vytvarovanými pájecími očky. Očka jsou přišroubována k profilu a slouží i pro uzemnění stínicího obalu. Stínicí punčošku lze zevně izolovat smrštitelnou bužirkou, je-li to nutné.

Stínit je nutné i součástky a případné pájecí body u mřížek vstupních elektronek. Pájecí body by měly být co nejmenší a vývody součástek co nejkratší. Vstupní konektory jsou připojeny k pájecím bodům na vstupu modulu stíněnými kablíky.

Zesilovač se při správné konstrukci odmění nezvykle velkým odstupem brumu do užitečného signálu, který zdaleka nemají ani tovární hudební zesilovače mnohem vyšší třídy (a ceny). Jediné, co by mělo být slyšet, je příjemný šum elektronek při vytočených potenciometrech. Je to dáno dobrou filtrací anodového napětí a stejnosměrným žhavením elektronek, které používá jen málokterý výrobce.

Elektronkové objímky použijte pokud možno s bajonetovými stínicími kryty, především pro první ECC83. Dovází si je několik firem, které u nás vyrábějí tuzemské elektronkové zesilovače, cena je poměrně vysoká, kvalita také. Rozhodně nepoužívejte bakelitové nebo pertinaxové objímky, nebylo by to spolehlivé a ani důstojné. Poohlédněte se po keramických objímkách u známých amatérů, ve starých zařízeních nebo

v kanálových voličích televizorů. Když je neseženete, stačí i objímky bez stínicího krytu, ale je potřeba pod šroubky přidat očka pro přichycení pružin, které budou držet elektronky na jejich místech. Na zátav na horní straně elektronky se nasadí další větší pájecí očko (se střední dírou o průměru asi 6 mm) se dvěma pájecími křídélky, do jejichž postranních děr se pružinky zaklesnou. Odstup při vytočených vstupních potenciometrech bude o něco horší, ale na hudební zesilovače ještě velmi dobrý. Vyzkoušejte i stínění hliníkovou fólií. Jako stínění dobře poslouží i trubka svinutá z tenkého pružného mosazného plechu, která se nasune na elektronku a uzemní.

Součástky vyhoví běžně používané, ovšem s axiálními vývody. Rezistory v katodách, mřížkách i anodové postačí běžné metalizované miniaturní na zatížení 0,5 W, filtrační rezistory v anodovém napětí použijte tzv. bezpečnostní. Poznejte se podle toho, že mají šedý matový povrch a při přetížení (při zkratu sběrnice anodového napětí na zem) se přeruší bez nějakých zvláštních světelných, tepelných, zvukových a pachových efektů.

Pozor na kondenzátory - nejen že je potřeba sehnat je pokud možno v provedení s axiálními drátovými vývody, abychom je nemuseli nastavovat, ale předepsáno je napětí minimálně 400 V. Na výstavě Ampér bylo několik tuzemských výrobců, kteří bez problémů takové kondenzátory s dielektrikem z plastů a axiálními vývody dodávají. Ovšem v prodejnách bývá situace horší, žádané, a proto i skladované jsou spíše součástky s vývody pro plošné spoje. Nezbyvá než zapátrat na internetu a součástky objednat přímo od výrobců - nesetkal jsem se zatím ze situací, že by rádi nedodali i malé množství. Také můžeme vývody kondenzátorů pro plošné spoje vytvarovat a nastavovat.

Elektrolytické blokovací kondenzátory C4, C7 a C16 doporučuji použít tantalové kapkové, používají se i v továrních elektronkových zesilovačích. Asi tak nevysychají jako hliníkové.

Kondenzátory pro filtraci anodového napětí nemusí být určené pro impulsní provoz (pro spínané síťové zdroje, zpravidla mají kapacitu 47 $\mu\text{F}/400\text{ V}$). Ty jsou zbytečně drahé, vyhoví běžné s drátovými vývody do plošných spojů za desetinu ceny. Kapacita může být i 33 nebo 68 μF , čím více, tím samozřejmě lépe. Času na nabití kondenzátorů během nažhávání elektronek je dost. Kondenzátory nejsou ohřívány elektronkami, jsou od nich daleko, takže nehrozí vysychání. Elektronky ECC83 mají povrchovou teplotu velice přijatelnou, tak kolem 50 °C.

Potenciometry - co prodejna, to jiný typ. U některých kusů zesilovačů jsem použil celoplastové černé potenciometry PIHER z GM Electronic, jejich málo odolné plastové hřídele nejsou ovšem pro hudební účely ideální. Navíc jsou hřídele „šišaté“ a každý potenciometr má jiný a ne příliš příjemný chod. V poslední době se v PS Electronic objevily vyhovující potenciometry potřebných hodnot s kovovou hladkou hřídelí. Dají se opatřit i potenciometry stejného typu, jako byly kdysi velmi dobré „teslácké“ TP 280, ovšem již nemají uhlíkový běžec. Varuji před provedením TP 160 s hřídelí o průměru 4 mm. Mají úhlovou vůli, chrastí nebo se celé rozpadnou. Dodávají se i s drážkovanou hřídelí o průměru 6 mm, což je sice lepší, ale běžec je pořád plechový, bez uhlíku.

Nezapomeňte na pojistky v přívodech od transformátoru. Jsou umístěny v plastových držáčkách, pro anodové napětí raději s izolační krytkou, provedení s pájecími očky, nikoliv do plošných spojů. Jsou dobře dostupné. Pojistky vyhoví T 63 mA pro anodové napětí a T 630 mA pro žhavení (T znamená pomalé pojistky). Zkrat anodového napětí by mohl být osudný pro transformátor - anodové vinutí je navinuto tenkým drátem a pojistka v primáru o zkratu anodového vinutí ani neví.

Zapojení a oživení

Po osazení všech součástek (což je práce snadná, snadno kontrolovatelná a lehce mnohokrát opravitelná, spleteme-li se, na rozdíl od plošných spojů), přístroj oživíme.



Obr. 69. Dokončený předzesilovač vestavěný do skříně zesilovače

Elektronky zatím nevklaďte. Po kontrole přiveďte nejprve napájecí napětí pro žhavení a zkontrolujte odběr a správnou velikost napětí 12 V za stabilizátorem. Zkontrolujte napětí na elektrodě S (source) tranzistoru BF245B. Mělo by být kolem 6 V a nesmí se měnit při otáčení potenciometrem hlasitosti. Pak přiveďte (opatrně!) anodové napětí z transformátoru. Kontrolujte napětí na výstupu usměrňovače D1, na filtračních rezistorech a na pájecích bodech anod elektronek. Všude naměříme bez elektronek asi 380 V - podle napětí transformátoru a vnitřního odporu měřidla. Měří se na dosti velkých impedancích, takže je nezbytné použít multimetr s odporem 10 MΩ. Ale stejně asi nikdo nepoužívá nic jiného.

Odpojte napájení a zasuňte elektronky. Pozor na nabité kondenzátory!! Znovu připojte napájení a měřte napětí na vývodech žhavení, mělo by být 12 V. Pozor na zapojení žhavicích vláken! Střed (vývod č. 9) nesmí být zapojen a vlákna jsou pro 12 V v sérii - zapojeny jsou vývody č. 4 a 5. Na anodách první až třetí triody naměřte po nažhavení velmi přibližně asi polovinu napájecího anodového napětí, na katodě čtvrté triody také. Pokud se nic nepálí, tak asi bude vše v pořádku.

Nyní už připojte osciloskop na výstup zesilovače, potenciometry nastavte na minimum a kontrolujte rušivé napětí. Asi nebude měřitelné.

Pak přiveďte postupně na vstupy modulu střídavé napětí asi 20 mV/1 kHz a sondou 1:10 osciloskopu (musí vydržet minimálně 400 V!) kontrolujte střídavou složku napětí na anodách příslušných systémů první ECC83 (na vývodech č. 1 a 6). Potenciometry GAIN nechte zatím na minimu. Při zvětšování vstupního napětí kontrolujte limitaci, dá-li se vznikající zkreslení takto nazvat. Spíše půjde o nesymetrické zakulacování sinusovky, což je u triod v pořádku.

Pak sondu připojte na anodu prvního systému druhé ECC83. Na vstupu nechte 20 mV/1 kHz, potenciometrem GAIN příslušného vstupu přidávejte, a kontrolujte opět střídavou složku, a to i při přebuzení při zvětšení vstupního napětí. Jistě bude vše v pořádku.

Sondu připojte na katodu posledního systému a tam naměřte totéž, co na anodě E2A. Katodový sledovač nejspíše správně sleduje. Pak ověřte chování při přebuzení a pokochejte se v tranzistorových zařízeních nezvyklým tvarem sinusovky. Zkreslení raději ani neměřte (stejně nemáte čím), a když, tak jen při „normálním“ vybuzení.

Pak přemístěte sondu osciloskopu na úplný výstup, vytočte potenciometr VOLUME (hlasitost - ten poslední před výstupem) a výstupní efektivní napětí udržujte potenciometrem GAIN příslušného vstupu kolem 1,5 V. Ověřte funkci korekcí. Nesmí vás překvapit jejich podivné průběhy oproti „normálním“ Baxandalovým, tak je to však u hudebních zesilovačů v pořádku.

Pokud máte pocit, že některý stupeň přeci jen zkresluje předčasně, můžete se pokusit o nápravu změnou odporu příslušného katodového rezistoru, ale asi nic oproti hodnotám ve schématu nevylepšíte. Snad jen limitaci tranzistoru BF245B můžete poupravit změnou odporu rezistoru R16, ale je až za regulátorem a víc než 1,5 V efektivní hodnoty napětí nepotřebujeme. Naopak, větší přebuzení následující vstupní části koncového zesilovače není žádoucí vzhledem k chování tranzistorů diferenčního stupně koncového zesilovače v saturaci.

K tomuto předzesilovači lze snadno přímo připojit jakýkoli koncový zesilovač popsany dále.

Při praktické stavbě se snažím použít raději typy elektronek ECC803S s delší životností a celkově lepšími parametry, není to ale podmínkou, obvyklé ECC83 také vyhoví po dlouhá léta. Můžete zkusit i ECC82, experimentovat se zvuky „lamp“ ECC83 a 12AX7 různých výrobců, ale přiznám se - nezjistil jsem nějaký rozdíl, a to ani měřením, ani poslechem. Samozřejmě - snadno se pozná „mikrofonní“ elektronka - během nažhazování se ozývají při vytočené hlasitosti různé zvuky - cinkání a lupance. To by celkem neškodilo, pokud tyto projevy po nažhavení ustanou. Pokud projevy mikrofoničnosti pokračují při poklepu na elektronku i po nažhavení, elektronku raději vyměňte. Dokonce může nastat i akustická vazba v blízkosti reproduktoru.

Podobné závady může způsobovat také objímka elektronky s nevhodnými nebo zoxidovanými kontakty nebo i zoxidované vývody samotné elektronky. Kvalitní elektronky mají vývody zlacené nebo alespoň leskle pokovené.

Předzesilovač s 2x ECC83 a 1x ECC82

Tento předzesilovač, jehož schéma je na obr. 71, je o něco složitější než předcházející zapojení.

Napájecí obvody jsou totožné - elektronky se žhívají stejnosměrným napětím 12 V (stabilizovaným IO μ A7812), anodové napětí se získává ze střídavého napětí o efektivní hodnotě okolo 280 V.

Vstupní část předzesilovače (včetně korektoru) je zapojena téměř shodně, jako u předcházejícího předzesilovače.

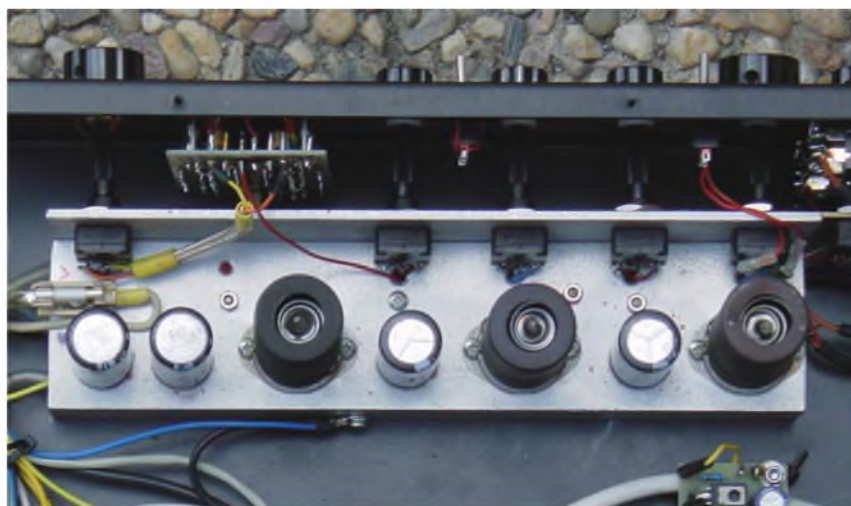
Za korekcemi je však zapojen další stupeň s obvyklou stejnosměrně vázanou dvojicí triod ECC82 - zesilovač a sledovač. Díky tomu může odpadnout tranzistor J-FET a impedančního přizpůsobení se dosáhne rozdělením katodového odporu posledního sledovačem na dva nestejně díly. Zesilovač má dostatečný napěťový zisk a ztráta napětí na děliči nevádí.

Elektronka ECC82 je schopna dát větší výkon do katodového rezistoru než ECC83. Katodový odpor tedy může být relativně malý a menší zatěžovací impedance koncového zesilovače (okolo 20 kΩ) nevádí. Optimální tvar signálu lze nastavit volbou rezistorů v katodě posledního sledovače.

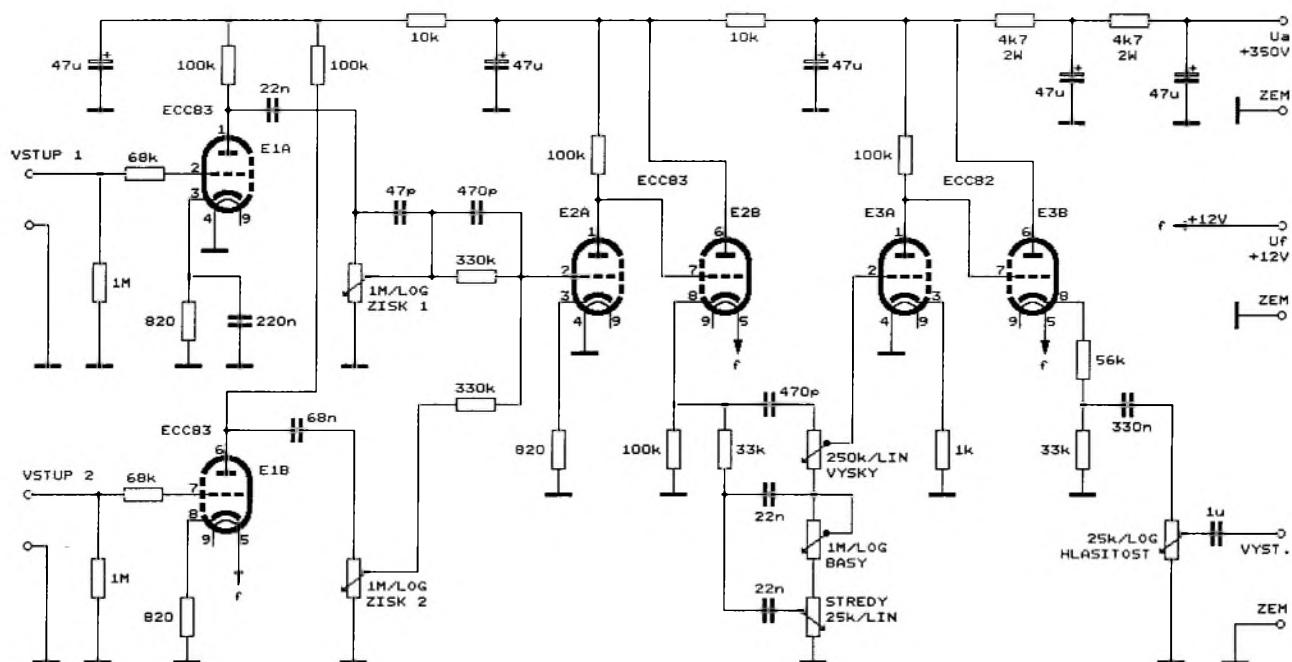
Pokud někdo požaduje „delší“ tón kytary, může i na posledním stupni beze změny součástek použít ECC83 - ta má větší napěťové zesílení a nastane tak dřívě „kulacení“ signálu. Obě elektronky jsou vývody zcela záměnné, můžete experimentovat s osazením a výsledným zvukem.

Maximální výstupní efektivní napětí na katodě sledovače je asi 30 V, proto se zmenšuje děličem a paralelně připojeným potenciometrem asi na pětinu, což vyhoví i pro vybuzení méně citlivých koncových zesilovačů.

Tento předzesilovač se chová při přebuzení trochu jinak, než předcházející předzesilovač s 2x ECC83. Omezení nastává v několika triodových stupních - v jednom před korekcemi a při vytočení korekcí na zdvih v příslušných kmitočtových pásmech i v předposledním napěťovém zesilovači a sledovači. Zesilovač je tedy vhodný i pro sólovou hru s delším sustainem.



Obr. 70. Předzesilovač s 2x ECC83 a 1x ECC82



Obr. 71. Schéma předzesilovače s 2x ECC83 a 1x ECC82

Mechanická konstrukce

Předzesilovač je postaven obdobným způsobem, jako předcházející předzesilovač se dvěma elektronkami. Hliníkový profil je samozřejmě delší, vynutilo si to použití tří elektronek. Potenciometry jsou umístěny stejným způsobem na pomocném panelu z hliníkového plechu nebo kuprexitu. Má to výhodu nejen ve variabilitě konstrukce a snadné výměně potenciometrů, ale také v ochraně potenciometrů proti axiálnímu nárazu a tlaku, pokud použijeme pružný plech neb kuprexit.

Elektrolytické kondenzátory jsou upevněny shodným osvědčeným způsobem, nezapomeňte je podlepit před montáží. Pokud zapomenete, je to možné napravit řidkým transparentním epoxidovým lepidlem dodatečně. Při použití lepidel se vyhněte vodou ředitelným, jsou dlouhou dobu elektricky vodivá a mohly by způsobit korozi vývodů.

Zesilovač je možné všelijak doplnit řadou přepínačů - k neblokovaným katodovým rezistorům všech stupňů se společnou katodou lze připínat různé blokovací kondenzátory s kapacitou od 47 nF do 47 µF pro úpravu kmitočtové charakteristiky podle vkusu hudebníka, případně je úplně odpojit, aby se zmenšil zisk. Také lze přepínačem měnit kapacitu kondenzátorů v korekcích apod. Přepínače se umístí na přední panel a ozdobí se jimi hotový zesilovač.

V katodách lze zapojit i rezonanční sériové obvody pro zdvih určitého pásma, ale v tom případě je vhodné zvětšit dost výrazně odpor katodového rezistoru, aby jím rezonanční obvod nebyl zatlučen. Doporučuji přepínat jen součástky, zapojené na nízkých impedancích - nejlépe tedy v katodě. Obvody v mřížkách a i anodách s vysokou impedancí jsou citlivé na rušivá napětí a vyžadují dokonalé stínění i pře-

pínačů. To má však za následek zvětšení parazitních kapacit a úbytek vyšších kmitočtů.

Oživení

Osadte všechny součástky, zkontrolujte zapojení, osadte pojistky a připojte žhavicí napětí z transformátoru. Bez elektronek zkontrolujte napětí pro žhavení za stabilizátorem. Připojte anodové napětí z transformátoru a opatrně změřte stejnosměrné anodové napětí v jednotlivých napájecích bodech na kondenzátorech a na anodových vývodech pro elektronky.

Odpojte napájení a zasuňte elektronky. Znovu připojte napájení a změřte napětí na vývodech žhavení 12 V. Napětí na vývodech elektronek jsou obvyklá - na anodách je asi polovina celkového napájecího napětí (které je na horním vývodu anodového rezistoru), na katodách sledovačů také.

Na vstup přiveďte sinusové napětí asi 20 mV o kmitočtu 1 kHz a postupně připojujte osciloskop se sondou 1:10 do uzlových bodů zapojení. Kontrolujte průběhy korekcí, tvar signálu při přebuzení a případné oscilace při vytočených potenciometrech. Pokud se oscilace nebo velké brumové napětí vyskytnou při vytočení potenciometrů GAIN, indikuje to nedostatečné stínění mřížkových vývodů prvního stupně nebo dlouhé a nestíněné přívody z anod k potenciometrům.

Aby se při vstupech bez signálu zamezilo nepřístojnému chování nástrojových zesilovačů, používají se vstupní konektory (zásuvky) jack se spínačem, který vstup bez zasunuté vidlice uzemní. Samozřejmě i zde jsou takové konektory použity (viz obr. 65). Pak ani nevyužitý vstup při náhodném vytočení jeho potenciometru GAIN prakticky nezanáší do signálu parazitní signály, nebo jen minimálně, protože elektronky



Obr. 72. Předzesilovač s 2x ECC83 a 1x ECC82 vestavěný v nástrojovém zesilovači o výkonu 200 W

s malým nebo nulovým mřížkovým rezistorem příliš nešumí.

Po oživení byl předzesilovač vestavěn do nástrojového zesilovače (obr. 72). Velikost výstupního napětí předzesilovače je dostatečná i pro vybudění méně citlivého modulu koncového stupně (např. některé zesilovače z PE mají vstupní citlivost kolem 5 V).

V zesilovačích pro kytary je velice výhodné použít dvojité indikátor vybudění se sloupcem LED. I v zesilovači na obr. 72 je takový indikátor použit, zapojení s IO TA7666P i desku s plošnými spoji jsem převzal z AR 3/1999.

Jeden vstup indikátoru se zapojí na bod před potenciometrem hlasitosti, druhý na běžec potenciometru hlasitosti, čili na vstup koncového zesilovače.

Pokud použijeme limitér (který bude popsán v dalším pokračování), zapojíme druhý vstup indikátoru přes odporový dělič na výstup koncového zesilovače.

První sloupec LED indikuje vybudění vstupu, které je u kytarového zvuku „LEAD“ (sólo) žádoucí co největší, druhý sloupec indikuje úroveň budícího signálu koncového zesilovače, čili výstupní výkon.

Předzesilovač můžeme postavit jako dvoukanalový přepínací, vstupy zapojíme paralelně a výstupy z potenciometrů GAIN připojujeme k dalšímu stupni pomocí relé.

Další relé může přepínat koncový zesilovač na běžce dvou paralelně zapojených výstupních potenciometrů pro regulaci hlasitosti. Relé lze ovládat nožním přepínačem pro různé styly hry. Korekce jsou ovšem společné pro obě cesty signálu. Variabilita zapojení je velká vzhledem k tomu, že nejsou použity plošné spoje.

Také lze do nástrojového zesilovače vestavět dva předzesilovače a jejich vstupy a výstupy přepínat šlapkou pomocí relé apod.

Myslím si, že stavba dvou zesilovačů je pohodlnější, můžeme navrhnout větší společné šasi na profil U a využít napájecí filtrační řetězec pro oba kanály. Ovládací potenciometry budou ve dvou řadách nad sebou. Při použití dvou stejných jednoduchých předzesilovačů lze rozmístit ovládací prvky podobně jako u továrních zesilovačů. Vhodné předlohy pro řešení designu najdete jistě na internetu na stránkách výrobců zesilovačů.

Samozřejmě lze počet kanálů ještě rozšířit o další kanály a nastavit zvuky kytary CRUNCH, LEAD, RHYTHM atd.

Předzesilovač s 2x ECC83 a integrovaným obvodem

U předzesilovače, jehož schéma je na obr. 74, je jeho výstupní impedance přizpůsobena relativně malé vstupní impedanci tranzistorového koncového zesilovače operačním zesilovačem.

Je to podobné řešení, jako používá třeba Marshall u elektronkových zesilovačů řady 2100 a 2500SLX.

V zesilovači MARSHALL 2100SLX je operační zesilovač IC1B pro přizpůsobení impedancí zapojen podle obr. 73 přímo za korekcemi, a regulace hlasitosti následuje až za operačním zesilovačem. Tím se však zmenší přebuditelnost operačního zesilovače, který by pak mohl nežádoucím způsobem ostře

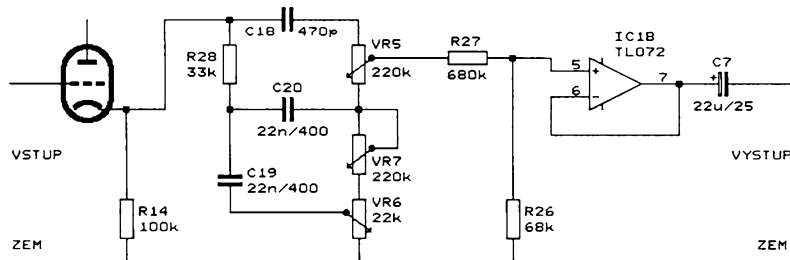
ořezávat signál. Marshall to vyřešil drastickým zmenšením úrovně signálu v poměru 1:11 děličem s R26, R27 zapojeným před operačním zesilovačem. To však zase nepřispívá k dobrému odstupu signálu od šumu.

Proto jsem raději operační zesilovač zařadil až za regulátor hlasitosti před koncový stupeň, čímž je přebuditelnost operačního zesilovače vyloučeno.

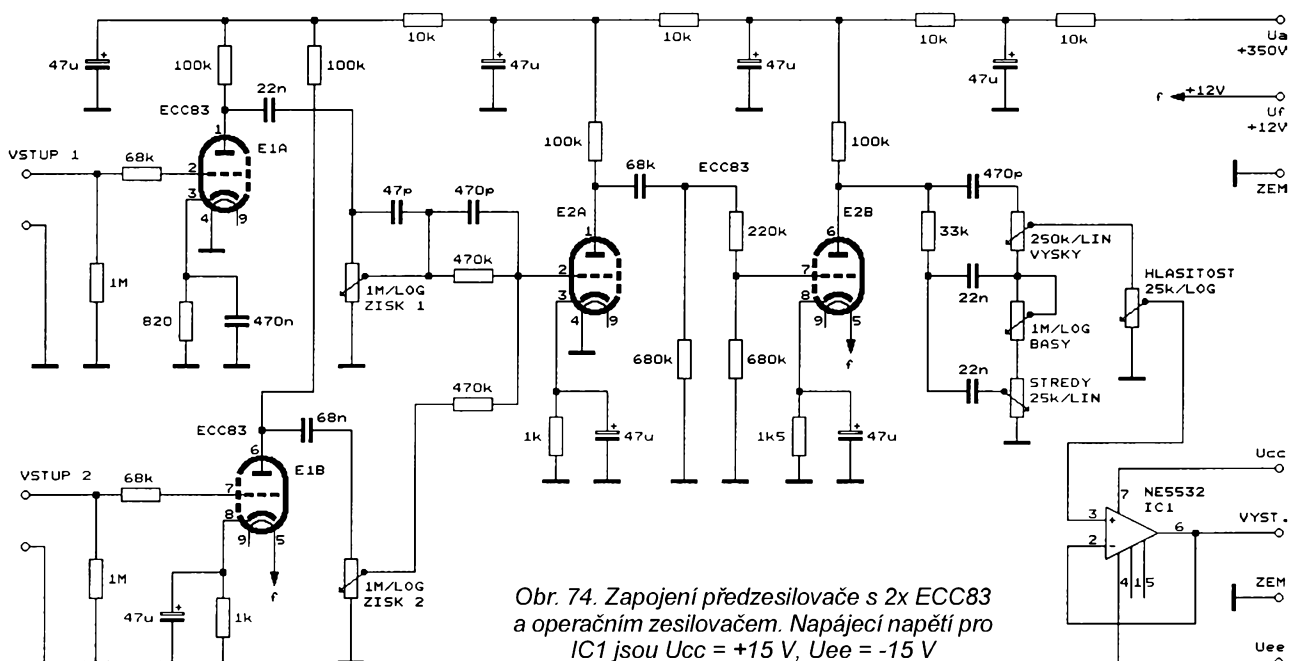
Zapojení elektronkové části předzesilovače je podobné jako u předzesilovače prvního, přibyla samozřejmě část s operačním zesilovačem, umístěná na zvláštní desce s plošnými spoji. Symetrické napájecí napětí ± 15 V pro operační zesilovač je odebráno ze zdroje nástrojového zesilovače, ve kterém je předzesilovač použit.

Protože operační zesilovač má jednotkové zesílení, malý šum a je rychlý, nezpůsobuje další nežádoucí zkreslení signálu. Je ovšem nutné zajistit, aby nikdy nepracoval v limitaci, čili to, aby omezení nastávalo jen v elektronkové části zapojení.

To je zajištěno tím, že, jak již bylo uvedeno, operační zesilovač je buzen signálem až za potenciometrem hlasitosti a výstupní signál předzesilovače je zaveden přímo na vstup koncového zesilovače. Takže pokud není přebuzen koncový zesilovač se vstupní citlivostí 1,5 V pro plné vybudění, nemůže být přebuzen ani operační zesilovač, který



Obr. 73. Impedanční přizpůsobení v zesilovači MARSHALL 2100SLX



Obr. 74. Zapojení předzesilovače s 2x ECC83 a operačním zesilovačem. Napájecí napětí pro IC1 jsou $U_{cc} = +15$ V, $U_{ee} = -15$ V



Obr. 75. Předzesilovač s 2x ECC83 a operačním zesilovačem vestavěný do skříň nástrojového zesilovače

při napájecím napětí ± 15 V začíná omezovat až při efektivním výstupním napětí asi 10 V.

Mechanická konstrukce předzesilovače byla přizpůsobena tomu, aby se vešel do volného místa ve skříni již hotového nástrojového zesilovače, která má výšku 88 mm. Jak je vidět z obr. 75, nebyl to velký problém.

Pro oživení předzesilovače se použije stejný postup, jako u předzesilovačů předchozích.

Celkově si myslím, že ožívání elektronických zařízení je snadnější než polovodičových - nevyskytují se žádné nepředvídatelné problémy, oscilace atd. Pouze je potřeba dát pozor na správné zemnění jednotlivých modulů (předzesilovačů a koncového stupně), aby se dosáhlo nejlepšího odstupu brumu. Často rozhodují centimetry vodiče.

Ke kontrole a „vychytání“ brumové napětí používám starý analogový milivoltmetr schopný indikovat napětí kolem 50 μ V. Je citlivější než osciloskop a analogový údaj ručky má v tomto případě něco do sebe - hledá se minimum a přesná velikost není důležitá.

Na velikost zbytkového brumu má spíše než filtrace napájecích napětí vliv vedení vodičů, obzvláště zemních, a jejich připojení ke společnému bodu.

U jednoho zesilovače byl jako zemnicí bod použit pásek laminátu o rozměrech 10x3 cm plátovaný mědí, na který byly připojeny i zemní vývody kondenzátorů zdroje pro koncový stupeň. Na výsledný brum mělo velký vliv (a to nejen měřitelný, ale i slyšitelný) připojení země předzesilovače na konec nebo na střed tohoto pásku. Procházející pulzující nabíjecí proud elektrolytických kondenzátorů vytvoří úbytek i na tak dokonalém vodiči, a ten se přenesení do signálové cesty.

Proto někdy nezbyvá než experimentálně nalézt optimální způsob zemnění, obzvláště chceme-li dosáhnout dobré hodnoty odstupu, za kterou po-

važují brumové napětí kolem 1 mV na výstupu pro reproduktor při stažené hlasitosti.

U zesilovačů pro hudební účely to sice není v praxi nakonec tak důležité (brum v pozadí je maskován ostatními hluky), ale konstruktérská čest asi nikomu nedá, aby řešil problém s kompromisy.

Nástrojový zesilovač s tímto předzesilovačem jsem řešil jako dvoukanálový se dvěma vstupy, avšak poněkud neobvykle.

Jako první vstupní díl jsem použil nepatrně upravený předzesilovač s tříkanálovými korekcemi, který byl uveřejněn již dříve v Amatérském rádiu, a to včetně desky s plošnými spoji.

Druhý vstup je osazen popsaným elektronickým předzesilovačem. Jako operační zesilovač, který je v druhém předzesilovači zařazen za regulátorem hlasitosti, je využit jeden z operačních zesilovačů v pouzdru NE5532 na desce prvního vstupu, původně určený pro efektní výstup.

Oba vstupy mají samozřejmě nezávislé nastavení zisku, tříkanálové korekce a regulaci hlasitosti. Jejich výstupy jsou smíchány přes dva rezistory do společného výstupu pro koncový zesilovač.

Hudebník tak má možnost volit jak mezi vstupem osazeným polovodiči s běžnými korekcemi s „normálním“ průběhem, tak mezi typickým elektronickým zvukem a „kytarovými“ korekcemi. Na tomto zesilovači si lze rychle ověřit, jak mnohem příjemnější je „elektronický“ zvuk nástroje a dokonce i mikrofonu, třebaže pro mikrofon není průběh „nástrojových“ korekcí určen.

Oba kanály v zesilovači lze využívat nezávisle pro dva hrající nástroje či nástroj a mikrofon, nebo lze jeden nástroj nožním přepínačem směřovat do jednoho nebo druhého kanálu pro různé požadavky na charakter zvuku.

Koncové zesilovače

Všechny zde popisované zesilovače jsou variabilní konstrukce, ve kterých je k různým předzesilovačům použit vždy shodný modul koncového zesilovače ve dvou verzích 200 W a 300 W, lišících se počty koncových tranzistorů.

Koncové zesilovače určené pro ozvučení (PA) mají ve stereofonním provedení stejný koncový modul, samostatný pro každý kanál.

Použití jednotného koncového modulu je dáno tím, že jsem po zkouškách s různými výrobky a zapojeními (trvajících 30 let) dospěl asi k nejlepšímu, mnohokrát ověřenému a současně levnému a jednoduchému řešení koncového zesilovače, které lze ve světě sehnat a „okopírovat“ (se souhlasem autora).

Je to zapojení zesilovače „LOW-TIM“ pana prof. W. Marshalla Leache z Georgia Institute of Technology v Atlantě, USA. Pokud se někdo vážněji zabývá elektroakustikou, doporučuji prostudovat jeho obsáhlé internetové stránky.

Je to zesilovač, který jsem již částečně popsal v PE 11/2002. Od té doby uplynul rok, tento modul z PE na upravené a vylepšené desce s plošnými spoji od firmy ELMECHANIK byl postaven stovkami amatérů, a ti, se kterými jsem mluvil, sdílejí můj názor.

Tento modul jsem později obvodově upravil a rozšířil pro použití tří párů koncových komplementárních tranzistorů - verze XVV.

Modul zesilovače v původním provedení se dvěma páry koncových tranzistorů vyhoví spolehlivě pro trvalý výkon do 200 W na zátěži 4 Ω , upravený se třemi páry tranzistorů pak pro 300 W/4 Ω . Skutečný výkon, který zesilovač asi vydrží, je mnohem větší, a zatím se nám nepodařilo žádný v provozu zničit. Dokonce ani „na stole“ při zkouškách a při mezním zatížení ne, jen jednou se mi vymstilo použití nejen tepelně, ale i elektricky vodivé silikonové stříbrné pasty, což „nevině odneslo“ několik koncových tranzistorů (viz článek v PE 5/2003).

Jako koncové tranzistory používám po různých testech prakticky jen typy z produkce firmy ON (bývalá sekce výroby polovodičových součástek Motorola), typy MJ15003 a MJ15004 v pouzdrech TO-3. Lze použít i typy MJ15022/15023, které jsou spíše určeny pro větší zatěžovací impedance - 16 nebo 8 Ω , protože mají větší povolené kolektorové napětí a menší povolený proud kolektoru.

Tranzistory MJ1500x jsem zvolil z několika důvodů. Jsou v osvědčeném kovovém pouzdru TO-3 a snadno se chladí, občas na tento typ pouzdra seženeme již vyvrtané a opracované chladiče z rozebranych zařízení. Dále jsou tyto tranzistory relativně levné (kolem 100 Kč s DPH, PNP i NPN) a i u nás díky dodavatelským firmám dobře do-



Obr. 77. ↑
Vhodné
tranzistory
MJ15003/15004



Obr. 76. →
Nevhodné
tranzistory
MJ15003/15004

stupné. Pro pouzdro TO-3 existují dobré izolační podložky a další montážní materiál. Tranzistory MJ15003/15004 jsou i spolehlivé a odolné, mají dobrý průběh křivky SOAR - povolené bezpečné pracovní oblasti. To znamená zjednodušeně, že vydrží současně velké napětí a velký proud, což některé jiné tranzistory nemusí snést. I když objevíme někde tranzistor s povolenou kolektorovou ztrátou 200 W, neznamená to, že „vydrží“ třeba 50 V a 4 A současně! Při návrhu zesilovače je potřeba s grafem povolené pracovní oblasti tranzistorů pracovat a respektovat ho. Naštěstí máme dnes internet a sehnat katalogové listy k tranzistorům není problém.

Je také nutné respektovat reálné podmínky chlazení koncových tranzistorů. Proto jsou tranzistory v popisovaných konstrukcích raději předimenzovány. To se vždy vyplatí, obzvláště u „muzikantských“ zesilovačů.

Při nákupu tranzistorů řady MJ je však nutné dávat pozor. Setkal jsem se totiž s typy, které byly sice označeny stejně - MJ15003 a MJ15004, i jméno původního výrobce Motorola sedělo a pouzdro dokonce vypadalo robustněji, ale uvnitř bylo zřejmě něco zcela jiného, typoval bych podle neodolnosti proti druhému průrazu tak na obdobu starého, a kdysi v době, kdy nebylo nic jiného i dobrého, KU605 až KU607 a jeho pomyslného a tehdy neexistujícího PNP komplementárního ekvivalentu. Tyto „podivné“ tranzistory MJ15003/4, byť mnohem levnější, se ukázaly jako nepoužitelné, a brzy bylo „po nich“. Pocházely z jedné pražské prodejny, a ani prodáváč v této prodejně (zřejmě patřící k výkonové nř problematice znalý, neboť je i přes ubývající porost hlavy dlouhovlasý), mi je sám moc nedoporučoval. Na obr. 76 a obr. 77 jsou jak vyhovující originální tranzistory ON, tak zcela nevhodné typy kupodivu se stejným označením.

Samozřejmě existují i další typy tranzistorů ve velkých plastových pouzdrech MT100 a MT200, které používají profesionální výrobci zesilovačů, ale jejich poměr cena/hodnota vychází při malých odběrech hůř. Pokud je sežene, lze beze změny zapojení použít

např. komplementární páry firmy SANKEN 2SA1493/2SC3857, 2SA1494/2SC3858 nebo velmi rychlé 2SA1216/2SC2922 či 2SA1295/2SC3264 s mezím kmitočtem přes 35 MHz.

A nyní k osvědčenému výkonovému zesilovači, použitému ve všech zde popsaných konstrukcích, podrobněji.

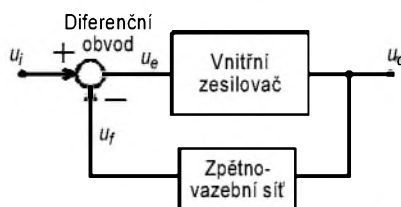
Mojí snahou bylo doplnit elektronkové předzesilovače opravdu kvalitním zesilovačem bez „tranzistorového“ zvuku.

Jednou z příčin tranzistorového zvuku zesilovačů je zkreslení TIM - transient intermodulation distortion. O tomto zkreslení a zesilovačích s malým zkreslením TIM se začalo mluvit již kolem roku 1970. Toto zkreslení se také nazývalo SID - slewing induced distortion nebo DIM - dynamic intermodulation distortion.

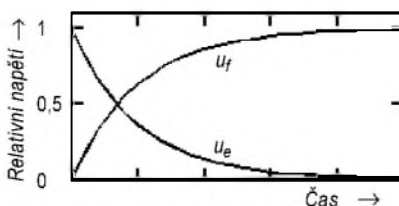
Uvedené zkreslení se objevuje tehdy, když jsou vstupní obvody zesilovače přetíženy signálem zpětné vazby, který se snaží vyrovnat zkreslení a zpoždění výkonové části zesilovače.

Pokud se vstupní obvody zesilovače signálem zpětné vazby zcela zahlťí, mluvíme o tvrdém TIM, když je zpětnovazební napětí vstupními obvody zkreslováno, jedná se o měkké TIM. Abychom si vysvětlili, jak TIM vzniká, podívejme se na obr. 78 a obr. 79.

Chybové napětí u_e je rozdíl mezi vstupním napětím u_i a napětím zpětné vazby u_f . Pokud je zesílení zesilovače s otevřenou smyčkou zpětné vazby velké, klidové chybové napětí u_e je malé a vstupní obvody nejsou přetíženy. Pokud přivedeme v čase $t = 0$ na vstup skok napětí u_i třeba 1 V (tzv. jednotkový skok), vstupní napětí se sice změní, a to na 1 V v čase $t = 0$, ale výstupní napětí u_o se nemůže ihned zvětšit, jak by odpovídalo skoku vstupního napětí. V čase $t = 0$ je tedy chybové napětí 1 V - vždyť je to rozdíl mezi vstupním napětím a napětím zpětné vazby. Jak narůstá čas, výstupní napětí u_o se exponenciálně zvětšuje (předpokládáme, že vnitřní zesilovač má charakter dolní propusti prvního řádu, tj. propusti



Obr. 78. Blokové zapojení zesilovače se zpětnou vazbou



Obr. 79. Časové průběhy zpětnovazebního napětí u_f a chybového napětí u_e

tvořené jedním článkem RC), to způsobuje zvětšování zpětnovazebního napětí u_f (předpokládáme, že zpětnovazební síť je čistě odporová), a díky tomu se zmenšuje u_e .

Pokud je pro sčítání vstupního a zpětnovazebního napětí použit diferenční obvod s bipolárními tranzistory, které lineárně zpracují diferenční napětí o maximální velikosti okolo 57 mV, diferenční obvod se při uvedeném jednotkovém skoku vstupního napětí zahlťí a vznikne tvrdé TIM.

Pro eliminaci zahlcení je nutné upravit diferenční obvod tak, aby se oblast lineárního zpracování diferenčního napětí rozšířila na několik voltů. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby. První možností je zapojit do série s emitory bipolárních tranzistorů diferenčního obvodu odpory, které vytvoří místní zpětnou vazbu a linearizují diferenční obvod, druhou možností je použít v tomto stupni tranzistory FET. Jelikož tranzistory FET mají podle autorových zkušeností nepředvídatelné a rozdílné vlastnosti a jsou náchylné ke generování výstřelkového šumu, je výhodnější použít běžné bipolární tranzistory s emitorovými odpory.

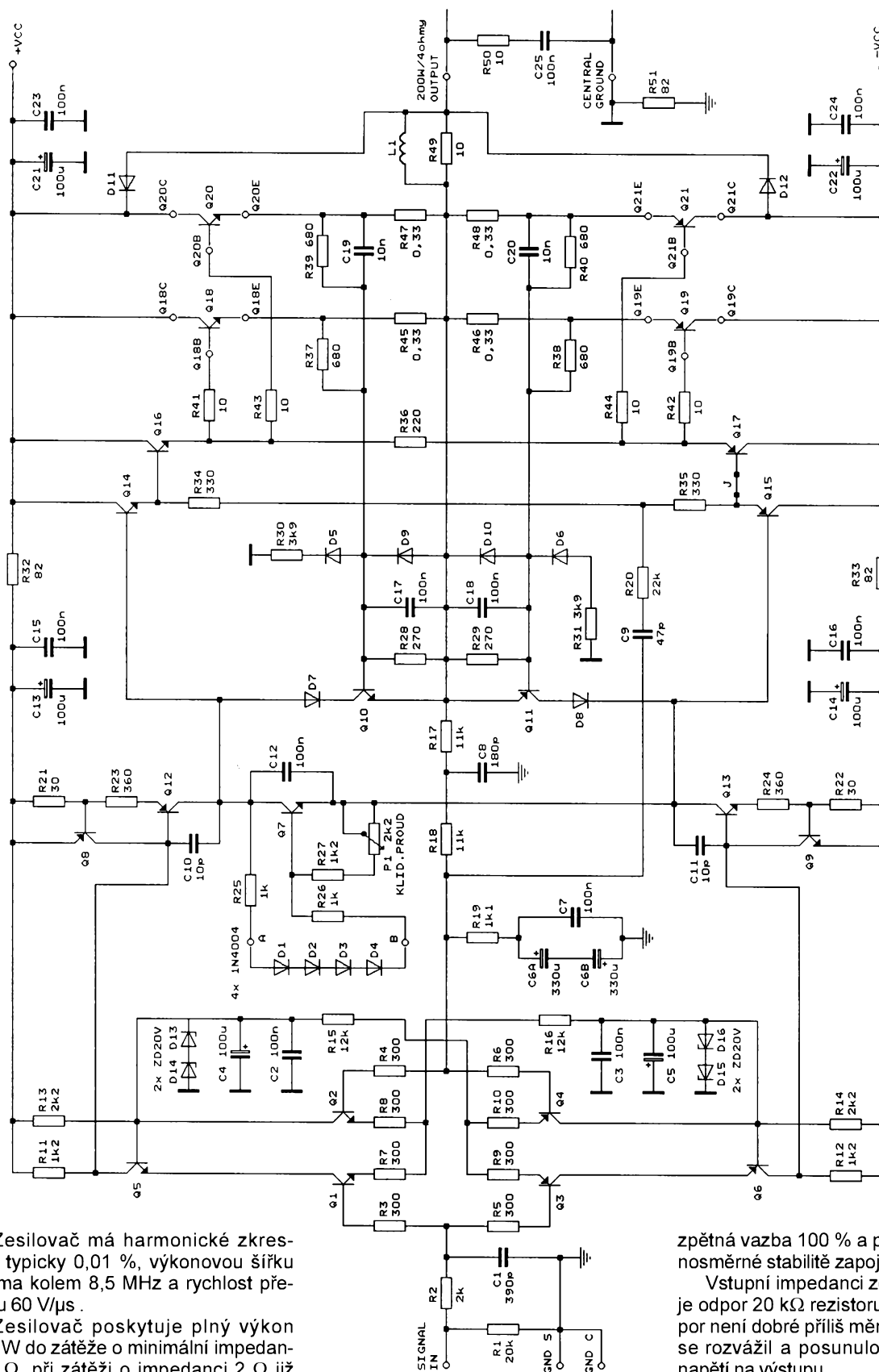
Časová konstanta exponenciální odezvy výstupního napětí zesilovače na jednotkový skok vstupního napětí (tj. časová konstanta exponenciály u_f na obr. 79) je nepřímo úměrná šířce pásma vnitřního zesilovače. Pokud je šířka kmitočtového pásma vstupního signálu omezená a je podstatně menší než šířka pásma vnitřního zesilovače, je možnost přebuzení vstupního diferenčního obvodu a tím vzniku TIM výrazně zmenšena. Je tak tomu proto, že průběh změny vstupního signálu nemůže být při omezené šířce pásma strmě pravouhlý, ale jen plynule exponenciální, takže výstup „rychlého“ vnitřního zesilovače téměř stačí změnu na vstupu sledovat.

Pro udržení stability zesilovače s uzavřenou smyčkou zpětné vazby nesmí být součin zisku a kmitočtového rozsahu vnitřního zesilovače příliš velký. Pokud zvětšujeme šířku pásma vnitřního zesilovače, musíme úměrně tomu zmenšovat jeho zisk. To vede ke konstrukci zesilovačů (především elektronkových) s malou nebo žádnou celkovou zpětnou vazbou.

Koncový zesilovač LEACH AMP 200 W/4 Ω

Popis funkce

Schéma zesilovače LEACH AMP 200 W/4 Ω je na obr. 80. Zesilovač je navržen tak, aby bylo minimalizováno TIM. V emitorech vstupních diferenčních stupňů jsou rezistory o odporu 300 Ω a šířka pásma zesilovače s otevřenou smyčkou zpětné vazby je upravena kondenzátory C10 a C11 v rozkmitovém stupni a kondenzátorem C9 ve zpětné vazbě mezi budičem a vstupem.



Obr. 80. Schéma zesilovače LEACH AMP (200 W/4 Ω)

Zesilovač má harmonické zkreslení typicky 0,01 %, výkonovou šířku pásma kolem 8,5 MHz a rychlost přeběhu 60 V/μs.

Zesilovač poskytuje plný výkon 200 W do zátěže o minimální impedanci 4 Ω, při zátěži o impedanci 2 Ω již začíná nasazovat proudová ochrana.

Zesilovač snese i velkou kapacitní zátěž, což je vhodné při spojení s některými typy reproduktorů a výhybek. Koncové tranzistory jsou chráněny napěťově a proudově citlivými omezovacími stupni.

Celkové napěťové zesílení A_u je určeno odpory rezistorů R17 až R19 v hlavní smyčce zpětné vazby a je asi 21 (zisk zesilovače je tedy 26,4 dB). Ze-

silení je dáno poměrem: $A_u = (R17 + R18 + R19)/R19$.

Zajímavé je rozdělení zpětné vazby na dvě větve - nad 150 kHz je účinná větev s C9 a R20 z budiče Q14, Q15 a přispívá tak ke stabilitě zesilovače při kapacitní a komplexní zátěži.

Pro stejnosměrné napětí a velmi nízké kmitočty (podle volby velikosti kapacity kondenzátorů C6A a C6B) je

zpětná vazba 100 % a přispívá ke stejnosměrné stabilitě zapojení.

Vstupní impedanci zesilovače určuje odpor 20 kΩ rezistoru R1. Tento odpor není dobré příliš měnit, zesilovač by se rozvážil a posunulo by se klidové napětí na výstupu.

Mezi vstupní svorku a zesilovač je zařazen integrační článek R2, C1 typu dolní propust, který v signálu potlačuje nežádoucí kmitočty nad 200 kHz.

Vstup zesilovače je řešen jako diferenční komplementární s tranzistory Q1 až Q4. Vstupní signál se přivádí na báze Q1 a Q3, signál zpětné vazby na báze Q2 a Q4. V diferenčním zesilovači se od vstupního signálu odečítá signál zpětné vazby a rozdíl se projevuje

jako změna kolektorového proudu tranzistorů Q1 a Q3. Těmito kolektorovými proudy jsou řízeny další tranzistory Q5 a Q6 s uzemněnou bází. Na jejich kolektorových rezistorech R11 a R12 se pak objevuje napětí pro další stupeň. Q5 a Q6 také zmenšují kolektorové napětí tranzistorů Q1 až Q4 a zabraňují jejich průrazu. Báze Q5 a Q6 jsou opřeny o napětí ± 40 V stabilizované dvojicí Zenerových diod D13 až D16.

Důležité jsou emitorové rezistory R7 až R10. Linearizují vstupní zesilovač a upravují jeho zisk tak, aby nemohl být přebuzen signálem zpětné vazby a nemohlo tak vzniknout zkreslení TIM. K vyloučení TIM přispívá také integrační člen R2, C1, který ze vstupního signálu odstraňuje kmitočty, na nichž by mohlo TIM vzniknout.

Tranzistory Q12 a Q13 tvoří rozkmitový stupeň, který napěťově zesiluje signál ze vstupního diferenčního zesilovače. Pomocné tranzistory Q8 a Q9 omezují maximální proud tranzistorů Q12 a Q13 při aktivaci ochranného obvodu koncových tranzistorů. Řešení rozkmitového stupně, stejně jako všech ostatních stupňů, je podrobně popsáno a zdůvodněno na webových stránkách původního autora (W. M. Leache).

Důležitou součástí zesilovače je obvod pro řízení klidového proudu koncových tranzistorů, který do značné míry určuje spolehlivost zesilovače pracujícího v dosti tvrdých podmínkách (hudební účely, velké zatížení). Obvod je vyřešen s tranzistorem Q7, jehož báze je ovládána napětím z odporového děliče. Součástí tohoto děliče je čtveřice sériově zapojených diod D1 až D4, které jsou umístěny na chladiči koncových tranzistorů a jsou s nimi v tepelném kontaktu. Po zahřátí se zmenšuje úbytek napětí na diodách a tranzistor Q7 se otevírá. Tím se udržuje přibližně konstantní klidový proud koncových tranzistorů. Velikost klidového proudu se nastavuje trimrem P1. Použité řešení má oproti běžnému snímání tranzistoru montovanému na chladič koncových tranzistorů výhodu v tom, že lépe stabilizuje klidový proud. Rezistory R25 a R26 izolují kapacitu diod od řídicího stupně a zlepšují tak vlnovost obvodu - až do takovýchto detailů je zapojení vyřešeno.

Budící a koncové tranzistory Q14 až Q21 posledních tří stupňů jsou v Darlingtonově zapojení se společným kolektorem. Koncové tranzistory tvoří paralelní dvojice, popř. u upravené verze XVV tvoří trojice. Rezistory R41 až R44 v sérii s bázemi koncových tranzistorů zabraňují parazitním oscilacím a linealizují činnost těchto tranzistorů.

Klidový proud doporučuje autor nastavit pro celý zesilovač kolem 100 mA (tomu odpovídá proud asi 40 až 45 mA každým koncovým tranzistorem). Podle mých zkušeností však stačí nastavit mnohem méně, přechodové zkreslení se ztrácí již při celkovém odběru modulu asi 30 až 40 mA.

Koncové tranzistory jsou chráněny obvodem, který omezuje jejich maximální proud. Ochranný obvod obsahuje tranzistory Q10 a Q11, které snímají napětí na emitorových rezistorech R45 až R48 koncových tranzistorů. V běžném provozu jsou tranzistory Q10 a Q11 nevodivé. Při zvětšení proudu např. koncových tranzistorů Q18 a Q20 nad stanovenou mez se úbytkem napětí z R45 a R47 přes dělič R37, R39 a R28 otevře tranzistor Q10 a omezi buzení tranzistoru Q14, čímž se zmenší i buzení koncových tranzistorů. Podobně funguje i tranzistor Q11 v dolní větvi zesilovače. Reakce ochrany při přechodových jevech je optimalizována kondenzátory C17 až C20. V zapojení ochrany musí být použity rychlé tranzistory a diody, což je při použití součástek podle seznamu splněno.

Diody D11 a D12 chrání koncové tranzistory proti přechodným napětím opačné polaritě, např. při indukční zátěži.

Seznam součástek (zesilovač z obr. 80)

R1	20 k Ω
R2	2 k Ω
R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10	300 Ω
R11, R12, R27	1,2 k Ω
R13, R14	2,2 k Ω
R15, R16	12 k Ω
R17, R18	11 k Ω
R19	1,1 k Ω
R20	22 k Ω
R21, R22	30 Ω
R23, R24	360 Ω
R25, R26	1 k Ω
R28, R29	270 Ω
R30, R31	3,9 k Ω
R32, R33, R51	82 Ω
R34, R35	330 Ω
R36	220 Ω
R37, R38, R39, R40	680 Ω
R41, R42, R43, R44	10 Ω
R45, R46, R47, R48	0,33 Ω /5 W, drátový
R49, R50	10 Ω /2 W, vrstvý nebo drátový, ne metaloxidový
P1	2,2 k Ω , trim desetitáčkový, popř. jednootáčkový
C1	390 pF, keramický
C2, C3, C15, C16, C23, C24, C25	0,1 μ F/100 V, fóliový
C7, C12, C17, C18	0,1 μ F/50 V, keramický nebo fóliový
C4, C5, C13, C14, C21, C22	100 nebo 220 μ F/63 nebo 100 V, radiální
C6A, C6B	330 μ F/63 V, rad. nebo 1x 220 μ F/50 V bipolární
C8	180 pF, keramický
C9	47 pF, keramický

C10, C11 10 pF, keramický
C19, C20 10 nF/50 V, keramický nebo fóliový

L1 tlumivka, 12 závitů drátem CuL o průměru min. 1 mm, navinuto na R49

D1, D2,
D3, D4,
D11, D12 1N4004 až 1N4007

D5, D6,
D7, D8,
D9, D10 1N4148

D13, D14,
D15, D16 Zenerova dioda 20 V/min. 0,8 W, doporučuji vybrat na shodné Zenerovo napětí

Q1, Q2,
Q5, Q7,
Q9, Q10 MPS8099 nebo MPSA 06 - NPN, 80 V, 0,2 A

Q3, Q4, Q6,
Q8, Q11 MPS8599 nebo MPSA56 - PNP, 80 V, 0,2 A

Q13, Q14 2N3440, 2N3439

Q12, Q15 2N5416, 2N5415 - NPN, >250 V, 1 A, 1 W

Q16 - PNP, >250 V, 1 A, 1 W

Q17 MJE15030 - NPN, 150 V, 8 A, 50 W

Q18, Q20 MJE150301 - PNP, 150 V, 8 A, 50 W

Q19, Q21 MJ15003 - NPN, 140 V, 20 A, 250 W

Pozn.: Všechny rezistory jsou se zatížitelností 0,5 W, není-li udáno jinak, s tolerancí 5 % a lepší - větší odchylka odporu znamená zbytečné stejnosměrné klidové napětí na výstupu zesilovače. Proto jsou v důležitých bodech předepsány odpory z řady E24. Lze je samozřejmě nahradit hodnotami řady E12. Odpory rezistorů je potřeba kontrolovat - obzvláště v symetrických obvodech.

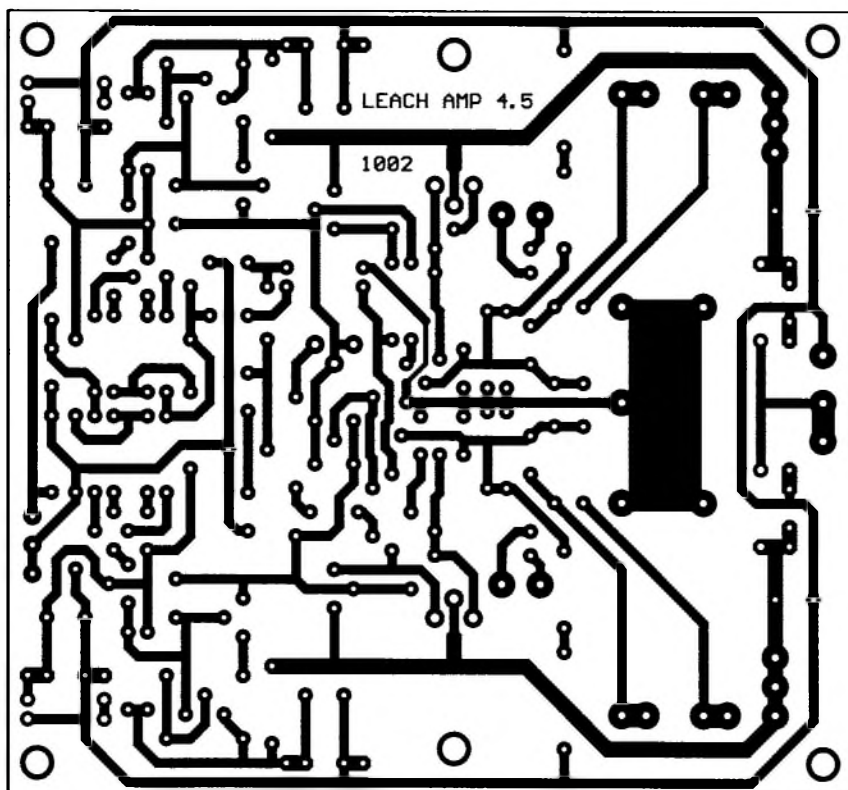
Rezistory R45 až R48 nepoužívejte metaloxidového typu - proudovými impulsy se zvětšuje jejich odpor!

Tranzistory pokud možno párovat. Neexistuje solidní náhrada za Q12 až Q15. U tranzistorů Q1 až Q11 je možná náhrada BC546/556, ale mají jinak vytvarované vývody.

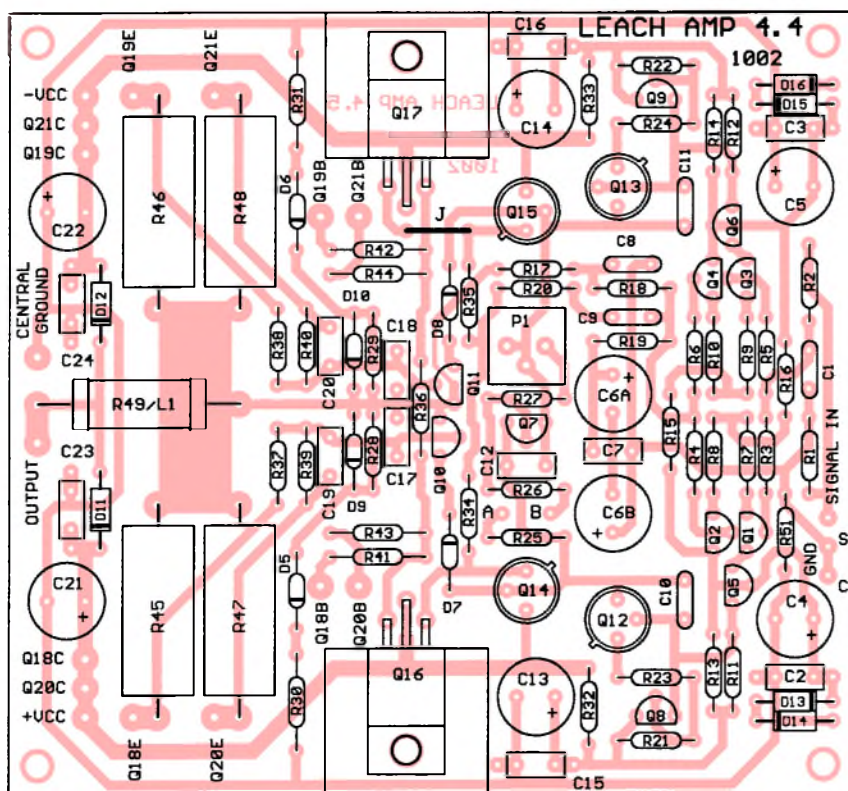
Stavba zesilovače

Všechny součástky koncového zesilovače s výjimkou koncových tranzistorů Q18 až Q21, diod D1 až D4 a Boucherotova členu R50, C25 jsou připájené na desce s jednostrannými plošnými spoji. Obrazec plošných spojů je na obr. 81, rozmístění součástek na desce je na obr. 82.

Obrazec spojů byl proti originálu upraven, aby se zlepšilo rozmístění součástek a zvětšily plošky pro přípojně body. Rozteč pájecích bodů byla způsobena součástkám dostupným a používaným v Evropě.



Obr. 81. Obrázek plošných spojů koncového zesilovače LEACH AMP 200 W/4 Ω (měř.: 1 : 1)



Obr. 82. Rozmístění součástek na desce koncového zesilovače LEACH AMP 200 W/4 Ω

Profesionálně vyrobené desky s plošnými spoji s potiskem a nepájivou maskou dodává firma ElmechaniK Vlastimil Srba, tel. 602 368 486. Tato firma dodává i sady vhodných vybíraných součástek a originálních koncových tranzistorů. Firma dodává i osazené a oživené desky zesilovačů tohoto pro-

vedení i upravené desky pro zesilovač s výkonem 300 W (verze „XVV“), ve kterém jsou použity 3 + 3 koncové tranzistory.

Před osazením běžných v obchodě nakoupených součástek je dobré je všechny zkontrolovat. Vstupní tranzistory vyberte alespoň na stejný zesilo-

vací činitel a napětí U_{be} při proudu asi 3 mA. Párování v celém pracovním rozsahu je obtížné, vybrat shodné dvojice jedné polarity je možné, ale u komplementárních párů se málokdy podaří, aby charakteristiky si byly v předpokládané pracovní oblasti alespoň podobné. Zenerovy diody vyberte s pokud možno zcela shodným napětím při proudu 3 až 5 mA. Pokud se párování podaří dobře, zesilovač má pak na výstupu velmi malé stejnosměrné napětí. U rozkmitového stupně a budičů kontrolujte také závěrné napětí. Zatím jsem se ale nesetkal s nevyhovujícím tranzistorem. Budiče Q16 a Q17 jsou opatřené chladičem - na desku se vejdou různé prodávané typy.

Koncové tranzistory také pokud možno co nejlépe párujte, což většinou nebývá jednoduché.

Na výběr je potřeba mít mnoho kusů tranzistorů, což je další důvod, proč využít dodavatele sady součástek. Pozor! Znovu upozorňuji na nevhodnost některých „záhadných“ sérií tranzistorů MJ15003/MJ15004!

Koncové tranzistory jsou umístěny mimo desku, takže lze použít různé chladiče podle možností a požadavků na trvalý výkon.

K elektrolytickým blokovacím kondenzátorům jsou paralelně připojeny fóliové kondenzátory s malým ESR, takže zesilovač je stabilní za všech podmínek a má dobrý přenos impulsních signálů.

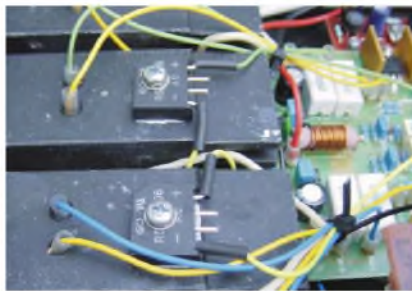
Při umísťování modulu ve skříni zesilovače je samozřejmě vhodné nepoužívat zbytečně dlouhé vývody ke koncovým tranzistorům a snímacím diodám. Přesto se ani při zkušebních konstrukcích a ožívování desek nevyskytly žádné problémy se stabilitou, i když tranzistory s chladičem byly od desky zesilovače poměrně daleko.

Snímací diody musí být umístěny na chladiči a mít s ním dobrý tepelný kontakt. Do chladiče lze např. vyvrtat díry a diody do nich těsně zasunout a zalepit tepelně vodivým kaučukem (dodává např. Elchemco, viz inzerce v PE).

Doporučuji umístit poblíž diod pomocnou svorkovnici, se kterou se přichytí vývody diod, aby se zabránilo jejich namáhání a případnému zkratu na chladič.

V jedné verzi zesilovače jsem nemohl průchozí otvory pro diody do velice robustního chladiče vyvrtat (základna byla příliš tlustá), tak jsem použil sice dražší, ale nakonec i méně pracné řešení (obr. 83). Pro snímání teploty jsem použil diody z můstkových usměrňovačů pro proud asi 3 až 5 A, v jejichž pouzdrech byla díra pro šroub. V chladiči jsem vyvrtal otvor, vyřízl závit a můstkový usměrňovač upevnil šroubem. Pouzdro usměrňovače má malý tepelný odpor (lisovací hmota je tepelně dobře vodivá) a regulace klidového proudu podle teploty funguje dobře.

Pokud použijeme jen dva chladiče (jeden pro tranzistory NPN a druhý pro



Obr. 83. Detail umístění diod D1 až D4, snímajících teplotu chladičů

PNP), lze využít vždy dvou diod v jednom můstku.

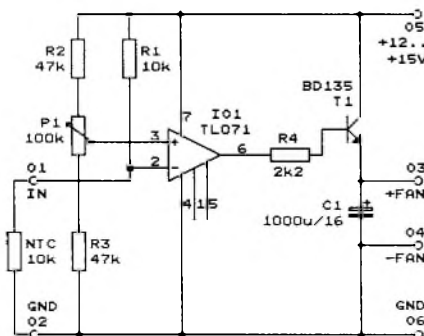
Pokud chceme dosáhnout velké spolehlivosti zesilovače i při extrémním zatížení, doporučuji neizolovat tranzistory od chladiče, ale izolovat raději celé chladiče - musí být proto minimálně dva. Při zkouškách se sebelépe provedenou izolací tranzistoru od chladiče různými druhy podložek byla vždy naměřena mnohem vyšší teplota pouzdra, než když byl tranzistor umístěn na chladiči přímo, bez izolační podložky. Rozdíl je opravdu velký a stojí za to se tímto problémem zabývat při návrhu mechanické koncepce zesilovače.

Jedno z možných řešení je na fotografii na obr. 84. Použitá skříň je tovární RACK 2U o hloubce 25 cm.

Pokud má chladič malé rozměry, je nezbytné použít nucenou ventilaci. Není to problém, do skříně RACK o výšce 2U (asi 89 mm) se vejde ventilátor o rozměrech 80x80 mm, třeba ze zdroje pro PC. Pro řízení ventilátoru se



Obr. 84. Upevnění izolovaných chladičů v zesilovači pomocí laminátových destiček



Obr. 85. Teplotní spínač ventilátoru. Ventilátor (FAN) se připojuje k vývodům O3 a O4

osvědčil např. obvod podle obr. 85. Byl uveřejněn v SaK 6/2001, ovšem s malou chybou - při použití předepsaných součástek (termistoru) fungoval obráceně - ventilátor běžel „za studena“. Správné zapojení je na obr. 85. Lze použít původní desku s plošnými spoji, ale součástky osadit jinak, podle správného schématu.

Jako snímač je použit termistor (NTC) o jmenovitém odporu 10 k Ω , který je umístěn na předpokládaném nejteplejším místě chladiče. Pokud neseženete termistor s předepsaným odporem, nevadí, zapojení se dá snadno přizpůsobit pro jiné odpory termistorů změnou odporů příslušných rezistorů v můstku. Termistor lze izolovaně vlepít tepelně vodivým lepidlem např. do otvoru pro vodič kabelového oka, a to pak přišroubovat.

Modul spínače s ventilátorem lze napájet ze stabilizátoru žhavicího napětí, ale u některých ventilátorů se může projevit rušení. Pokud nepomůže odstranění článkem RC nebo LC, je lepší použít další stabilizátor 7808 až 7812 nebo napájet ventilátor přes srážecí rezistor napětím asi 18 V z bodu před stabilizátorem. Odporem srážecího rezistoru lze nastavit optimální otáčky ventilátoru - není třeba ho napájet plným napětím 12 V, ale stačí 7 až 9 V. Ventilátor je pak mnohem tišší a asi i vydrží déle. Účinnost chlazení je i tak dostatečná, ovšem je potřeba dobře rozmyslet „aerodynamiku“ chladičů a celého zesilovače.

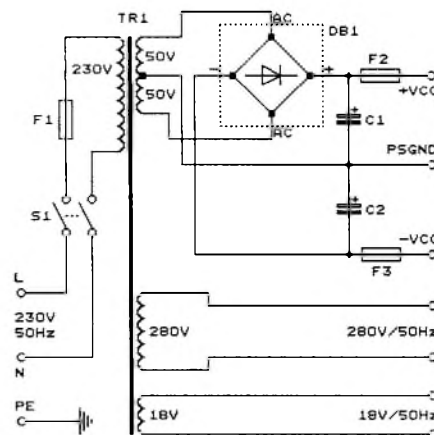
Seženete-li ventilátor 80x80 mm na střídavé napětí 24 V, který neruší a je vzhledem k malým otáčkám tichý, lze ho napájet přímo z vinutí transformátoru pro žhavení a provozovat ho trvale.

Ventilátor lze také spínat teplotním spínačem z pračky, sušičky nebo myčky s rozpínací teplotou asi 60 °C, který umístíme na chladič. Tyto spínače pracují obráceně - při zvýšení teploty vypínají, takže je potřeba vyřešit spínání třeba pomocí relé, nejlépe polovodičového.

Napájecí zdroj pro zesilovač

Zesilovače zkonstruované z popisovaných modulů předzesilovačů a koncových zesilovačů se napájejí velmi jednoduchým síťovým zdrojem, jehož schéma je na obr. 86. Součástky zdroje jsou dimenzovány podle počtu použitých koncových zesilovačů a podle jejich požadovaného výkonu. Při použití několika koncových zesilovačů jsou použity samostatné pojistky F2 a F3 pro každý koncový zesilovač.

Síťový transformátor TR1 jsem ve všech verzích nástrojových zesilovačů použil vždy toroidní. I koncové PA zesilovače s těmiž moduly byly osazeny toroidními transformátory (s jedinou výjimkou - v jednom zesilovači jsem využil transformátor 2x 50 V na jádru C



Obr. 86. Napájecí zdroj pro zesilovač s jedním koncovým stupněm

vymontovaný z továrního zařízení a koupený na radioamatérském „bleším trhu“).

Výkon transformátoru musí odpovídat předpokládanému výkonu zesilovače, a ten je zase závislý na napájecím napětí koncového stupně - obě hodnoty tedy na sobě závisí. Je tedy nerozumné nechat vyrobit transformátor s napětím 2x 35 V pro výkon 500 W, když z jednoho koncového stupně při tomto napětí hlavního sekundárního vinutí dostaneme sotva 120 W do impedance 4 Ω nebo polovinu tohoto výkonu do 8 Ω . Pro dva popisované koncové zesilovače stačí transformátor navržený pro výkon 250 W.

Hudební PA zesilovače sériově vyráběné mají transformátory výkonové dosti poddimenzované. U transformátoru pro hudební účely je spíše než maximální trvalý výkon důležitý malý vnitřní odpor hlavního sekundárního vinutí pro dosažení malého poklesu napětí při za-



Obr. 87. Běžné toroidní trafo



Obr. 88. Toroidní trafo určené pro akustické účely

Tab. 1. Dimenzování transformátoru TR1 a vyhlazovacích kondenzátorů C1 a C2 napájecího zdroje podle výkonu zesilovače při zátěži 4 Ω

Výkon zesilovače	Výkon transformátoru	Napětí hlav. sekund. vinutí	Vyhlazovací kondenzátory
1x 100 W	150 W	2x 35 V	C1 = C2 = 5000 µF/50 V
2x 100 W	250 W	2x 35 V	C1 = C2 = 10 000 µF/50 V
1x 200 W	250 W	2x 40 V	C1 = C2 = 10 000 µF/63 V
2x 200 W	400 W	2x 40 V	C1 = C2 = 20 000 µF/63 V
1x 300 W	300 W	2x 50 V	C1 = C2 = 15 000 µF/70 V
2x 300 W	500 W	2x 50 V	C1 = C2 = 33 000 µF/70 V

tižení špičkami hudebního signálu. To znamená použít sice počet závitů odpovídající jádru, ale vinutí provést tlustším drátem, než odpovídá výpočtu pro trvalé zatížení. Bohužel výrobce, u kterého jsem transformátory nechával dělat (TRONIC prostřednictvím PS Electronic), uvažuje při zadávání vinutí pouze aritmeticky, a přestože na toroidním transformátoru je dost místa pro tlustší vodič, nelze ho k použití „zbytečně“ tlustšího vodiče donutit. Pak je lepší transformátor dimenzovat „o stupeň“ výkonnější.

Výrobce dodává dvě provedení toroidních transformátorů - jedno je běžné (obr. 87) a druhé je určené právě pro elektroakustické aplikace (obr. 88). Je na obvodu vinutí stíněno páskem plechu z permalloye a má i menší sycení. Nejistil jsem však rozdíl v brumu zesilovačů při použití běžných i akustických transformátorů, vše spíše záleží na zemnění a vedení vodičů.

V tab. 1 jsou pro různé požadované výkony zesilovačů uvedené potřebné výkony transformátorů a přibližné velikosti napětí hlavních (výkonových) sekundárních vinutí. Tab. 1 byla vytvořena víceméně empiricky na základě naměřených výsledků.

Relativně menší transformátory pro větší výkony zesilovačů jsou použity ze dvou důvodů. Především z cenových, a dále proto, že velké výkony zesilovačů jsou využívány jen ve špičkách. Většinou by je trvale nesnesly ani použité reproduktory. O co jsou „slabší“ transformátory, o to jsou větší kapacity použitých vyhlazovacích kondenzátorů.

Dosažený výkon prakticky nezávisí na typu koncového zesilovače, který použijeme. I verze se šesti koncovými tranzistory dá při napětí transformátoru 35 V jen 100 W, naopak verze jen se čtyřmi koncovými tranzistory by dala při napětí transformátoru 50 V výkon 300 W - to už by však bylo na tranzistory moc (i když to s dobrým chlazením také vydrží).

Další sekundární vinutí (pro napájení anod elektronek) má napětí kolem 280 V a vinutí pro žhavení a pomocné obvody má napětí asi 16 až 18 V.

Pokud potřebujeme symetricky napájet operační zesilovače, je nutné nechat navinout ještě další vinutí s napětím 16 až 18 V. Všechna napětí v tab. 1 jsou udávána při zatížení.

Toroidní transformátory mají velký náběhový proud při zapnutí a u větších typů občas vypínají rychle jističe v síťovém rozvodu.

U transformátorů nad 300 W je proto nutné zařadit do primárního vinutí pro 230 V zvláštní termistor, který také dodávají výrobci transformátorů. Velký počáteční odpor termistoru se po zahřátí rychle zmenší a zůstává malý.

Tento termistor se montuje nejlépe na tepelně odolnou keramickou svorkovnici při dodržení bezpečnostních podmínek.

Transformátor nechte vyrobit se zalitým středem, montáž je pak snadná pomocí jediného šroubu uprostřed. Vhodné je nechat tenká vinutí vyvést lanky.

Příklad typického objednávkového formuláře transformátoru je na obr. 89.

Napětí hlavního sekundárního vinutí se usměrňuje můstkovým usměrňovačem DB1 - kostkou se středovou dírou. Doporučuji použít typ pro minimálně 35 A, lépe však pro 50 A. Je to součástka velice namáhaná proudovými impulsy při zapnutí a menší usměrňovač by namáhání nevydržel.

Elektrolytické kondenzátory C1 a C2 v usměrňovači pro napájení koncového stupně je potřeba zvolit vždy pokud možno co největší. K volbě přibližné velikosti kapacity kondenzátorů poslouží opět tab. 1.

Kondenzátory by v optimálním případě měly být takového typu, který je určen pro větší proudové impulsy. Takové kondenzátory mají menší ESR (ekvivalentní sériový odpor) a dají potřebný proudový impuls tehdy, když je to potřeba. S velkou kapacitou a na napětí 60 až 80 V jsou však velice drahé. Mají obvykle šroubové vývody a jsou robustnější, než typy pro plošné spoje (obr. 90).

Pokud použijeme běžné typy, je účelné poskládat výslednou kapacitu z několika kusů kondenzátorů, např. ze tří nebo i z šesti. Zmenší se tak proudové namáhání a vnitřní impedance konden-

Objednávka transformátoru No. 1617

Dodavatel:

14.5.2003 15:10:22

Odběratel:
ELIX

Tor. AUDIO Se Středem 200 VA Toroid

230 V L 0,15m

0 V L 0,15m

50 Vo 1,8 A - V 0,15m
Napětí naprázdno!

0 Vo V 0,15m
Napětí naprázdno!

50 Vo 1,8 A - V 0,15m
Napětí naprázdno!

280 Vo 0,03 A - L 0,15m
Napětí naprázdno!

0 Vo L 0,15m
Napětí naprázdno!

18 Vo 0,6 A - L 0,15m
Napětí naprázdno!

0 Vo L 0,15m
Napětí naprázdno!

Použité zkratky: L ... Nastavení tenkého drátového vývodu lícnou
V ... Volný drátový vývod opatřený bužirkou

Počet kusů: 1 ks

Termín dodání: 30 pracovních dnů => 0%

Doprava: Vlastní

Cena (1 ks): 777 Kč bez DPH

Záloha: 500 Kč

Platba: Hotově

Obr. 89. Objednávkový formulář transformátoru.



Obr. 90. Vhodné typy elektrolytických kondenzátorů

zátorů. Kondenzátory se připevňují objímkami nebo pásky. Jelikož jsou rozměrné a těžké, je potřeba jejich upevnění věnovat patřičnou pozornost.

Nezapomeňte na pojistky. Jedna by měla být použita na primární straně transformátoru (F1 - zpožděná, typ T) a další dvě rychlé (typu F) v přívodu ke každému modulu koncového zesilovače za elektrolytickými kondenzátory (F2, F3).

Pro výkon modulu kolem 100 W vyhoví F2 a F3 typu F3,15A, pro 200 W je F2 a F3 typu F4A a pro modul 300 W je F2 a F3 typu F6,3A. U modulu 300 W jsou pojistky umístěny v držácích přímo na desce s plošnými spoji. Vhodná hodnota pojistek se ukáže v provozu. Používáte-li reproduktory s impedancí větší, např. 8 Ω a více, stačí pojistky pro menší proud, i dosažitelný výkon je však menší.

Použité konektory

Pro vstupy nástrojových zesilovačů se používají výhradně konektory jack o průměru 1/4", tj. asi 6,35 mm. Jejich zapojení je nesymetrické, tj. je na ně připojen živý vodič a zem. Nástrojové kabely jsou koaxiální s velkou flexibilitou a pokud možno s malou měrnou kapacitou. Panelové konektory (zásuvky) se zpravidla řeší jako rozpojovací - živý kontakt vstupu je v klidu uzemněn kontaktem, který se při zasunutí vidlice rozpojí.

Výhodné je použít třípólové stereo-fonní zásuvky jack a střední kontakt také uzemnit. Pak lze do této zásuvky bez problémů zapojit i symetrický kabel (třeba od mikrofonu) se dvěma zkroucenými vodiči ve společném stínění.

Jako výstupy a vstupy efektových zařízení se používají také nesymetrické konektory jack, v případě vstupu „insert“ pro další zařízení, které se vkládá do signálové cesty, se používají rovněž rozpojovací stereo-fonní konektory jack. Rozpojovací kontakt při zasunutí vidlice rozpojí cestu signálu uvnitř předzesilovače, na středním vodiči panelové zásuvky je výstup do efektu (send), na vrcholu konektoru je vstup z efektu (return). Jako kabel pro „insert“ nelze využít symetrický mikrofonní nebo linkový kabel, v němž by vlivem vzájemné kapacity vodičů nastával na vysokých kmitočtech přeslech mezi vstupem a

výstupem. Proto musí být použit kabel se dvěma samostatně stíněnými žilami.

Konektory jack se vyskytují v mnoha mechanických provedeních. Přestože jsou konstrukčně jednoduché, jsou častým zdrojem závad.

U panelových zásuvek se projevuje únava pružin, nespolehlivý kontakt, vytlačení otvoru nebo vylomení příruby při bočním namáhání, stržení závitů pro matici atd.

U šňůrových vidlic se uvolní a otáčí zemnicí nebo středový kontakt, vytrhává se nedostatečně fixovaný kabel atd.

Proto používejte vždy pouze kvalitní a bohužel cenově tomu odpovídající provedení, především u zásuvek, které se obtížněji vyměňují.

Vstupní konektory jack také musí být také vzhledem k problémům se zeměmi izolovány od panelu, což bez dalších izolačních podložek umožňují jen plastová provedení.

Jako linkové výstupy by měly být použity tříkolíkové konektory typu XLR (obr. 91). Ty ovšem vyžadují zásadně symetrické zapojení - kontakt 1 je ZEM, kontakt 2 je POZITIVNÍ SIGNÁL a kontakt 3 je NEGATIVNÍ SIGNÁL.

Proto je nutné symetrizovat signál pomocí nějakého obvodu s operačními zesilovači, jaký byl uveřejněn např. v KE 5/1998 na s. 177, nebo je nutné použít linkový symetrizační transformátor, což není asi moc reálné.

Nepokoušejte se zapojovat konektory XLR jako nesymetrické, s uzemněným kontaktem 3. Časem by se to jistě projevilo po propojení v nefunkčnosti některé části aparatury vlivem nesprávného zemnění právě v době, kdy to je nejméně potřeba - před koncertem.

Reproduktorové výstupy se u komb a hlav (hlava je v řeči hudebníků samostatný nástrojový zesilovač určený k postavení na reproduktorovou soustavu) vyvádějí v naprosté většině na zásuvku jack 6,35 mm, v koncových zesilovačích pro ozvučení (PA) pak téměř zásadně na konektory (zásuvky) SPEAKON (obr. 92). Výjimečně se u menších PA zesilovačů výstupy pro reproduktor řeší i pérovými svorkami nebo šroubovacími kontakty.

Konektory SPEAKON jsou zpravidla čtyřpólové, vývod označený 1+ je hlavní výstup pro reproduktor, 1- je zem nebo v případě můstkového zapojení druhý pól reproduktoru (invertující), další vývody 2+ a 2- slouží např. pro připojení dalších reproduktorů, biwiring atd.

Konektory SPEAKON v kvalitním provedení (NEUTRICK) jsou spolehlivé a robustní, nevýhodou jsou jejich dost velké rozměry a hloubka za zesilovačem. Pozor na montáž kabelů do některých šňůrových konektorů SPEAKON. Mají málo pevné svorky a při utažení šroubů se utrhnou.

Výhodné je u zesilovačů i reproduktorových soustav použít paralelně zapojené dva druhy konektorů - SPEAKON a jack. Může nastat situace, kdy budete potřebovat právě ten druhý.



Obr. 91. Konektory XLR různých provedení



Obr. 92. Konektory SPEAKON

Jako reproduktorové kabely lze do konektorů SPEAKON při menších délkách použít síťový kulatý kabel o průřezu žil 2,5 mm², při větších délkách nad asi 10 m jsou nutné speciální kabely k tomu určené s průřezem žil kolem 4 mm². Pro reproduktory zapojené přes konektory jack existují souosé kabely s větším průřezem žil, rozhodně nelze použít nástrojové kabely.

Nástrojový zesilovač s koncovým stupněm 200 W

Tento zesilovač obsahuje moduly předzesilovače s 2x ECC83 a koncového zesilovače LEACH AMP 200 W/4 Ω a odpovídající napájecí zdroj.

Zesilovač lze snadno doplnit modulem vynikajícího a jednoduchého limitéru s lineárním optočenem, který bude popsán v dalším pokračování (v KE 2/2004). Tak zesilovač dále získá na zvukové kvalitě a dosáhne se větší subjektivní hlasitosti bez „tranzistorového“ zvuku při přebuzení.

Příklad rozmístění chladičů, transformátoru a předzesilovače ve skříni zesilovače je patrné z obr. 93.

Zesilovač má samostatné chladiče pro každý koncový tranzistor, vyhlazovací kondenzátory ve zdroji mají kapacitu 2x 10 000 μ F, napětí hlavních sekundárních vinutí transformátoru je 2x 48 V. Dosažený výstupní výkon je 230 W na zátěži 4 Ω a 160 W na zátěži 8 Ω . Je použit první z popsaných předzesilovačů s 2x ECC83 a impendančním přizpůsobením tranzistorem J-FET.

Vlastnosti zesilovače jsou podle slov hudebníků velmi dobré.

Propojení jednotlivých modulů předzesilovače a koncového stupně je jednoduché - výstup předzesilovače se propojuje se vstupem modulu koncového zesilovače stíněným kabelem. Země se přivedou do společného bodu - na střední vývod vyhlazovacích elektrolytických kondenzátorů zdroje. Vstupní zem modulu koncového zesilovače je oddělena od jeho výstupní země rezis-



Obr. 93. Rozmístění dílů v nástrojovém zesilovači 200 W

torem R51. Toto řešení potlačuje vliv zemních smyček a zvětšuje odstup brumu od signálu.

Zesilovač z obr. 93 má navíc symetrický linkový výstup s konektorem XLR do směšovacího pultu. Symetrický výstupní signál se získává továrním linkovým transformátorem. Primární vinutí tohoto transformátoru je pro jednoduchost připojeno přes dělič ze dvou rezistorů přímo na výstup zesilovače.

Oživení modulu koncového zesilovače

Při správném osazení desky s plošnými spoji se oživení skládá pouze z nastavení klidového proudu koncových tranzistorů a ověření funkce zesilovače.

Nejprve zkontrolujte osazení součástek, připojení a izolaci koncových tranzistorů, snímacích diod a napájení. U desek od firmy Elmechanik snad není možné se splést - desky jsou potištěné a mají kvalitní povrch a nepáji-vou masku. Od doby, kdy jsem tuto firmu objevil, rád využívám kvalitní spoje a občas si nechám zde modul i osadit - spoje pájené vlnou jsou spolehlivější a především vzhlednější. I sada součástek vyjde levněji.

Nezapomeňte na Boucherotův RC článek (R50, C25) na výstupu zesilovače (součástky jsou připájené na výstupním konektoru). I bez něj je zapojení sice stabilní, ale pan Leach ho tam určitě nedal zbytečně.

Pro oživení bude potřebný osciloskop, nf generátor a zatěžovací rezistory o odporech 4 a 8 Ω .

Na místo pojistek F2 a F3 zapojte ochranné rezistory o odporu asi 33 až 56 Ω na zatížení 5 až 10 W. Používám přípravek podle obr. 94.

Obr. 94.
Přípravek
na ožívování
zesilovačů



Trimr P1 pro nastavení klidového proudu natočte tak, aby měl největší odpor. Tranzistor určující klidový proud bude co nejvíce otevřen a klidový proud bude nejmenší. Připojte napájecí napětí - ideální je zapojit primární vinutí síťového transformátoru TR1 na výstup regulačního transformátoru a primární napětí postupně zvětšovat.

Na ochranných rezistorech o odporu 33 Ω by měl být úbytek napětí do 1 V a na výstupu zesilovače by proti zemi mělo být malé napětí do 30 mV. Napájecí napětí zvětšete až na jmenovité (230 V) nebo o trochu více, umožňuje-li to regulační transformátor. Zesilovač nechte asi 5 minut zapnutý a kontrolujte napětí na výstupu - nemělo by se zvětšovat. Zbytkové stejnosměrné napětí na výstupu je závislé na výběru Zenerových diod, tranzistorů a i na přesnosti rezistorů. Závisí také na stejnosměrném vnitřním odporu zdroje signálu, ze kterého je buzen koncový stupeň. Proto je dobré i při zkouškách zapojit vstup koncového stupně přes oddělovací kondenzátor o kapacitě asi 1 μ F. Tento oddělovací kondenzátor je obvykle součástí předzesilovačů, u modulu koncového zesilovače s výkonem 300 W je již na desce s plošnými spoji.

Občas se povede, že je klidové napětí prakticky neměřitelné, jindy zase může být větší, nemělo by však být nikdy větší než 30 mV. Je-li např. 10 mV, pak do zátěže 8 Ω poteče v klidu stejnosměrný proud 1,25 mA, a to je zcela zanedbatelné. Většinou se napětí pohybuje kolem 5 až 20 mV.

Na vstup modulu připojte tónový generátor, ochranné rezistory v napájení zatím ponechte. Kmitočet generátoru nastavte na 1 kHz a zesilovač opatrně vybudte na výstupní napětí asi 0,5 V, bez zátěže. Pokud zesilovač správně zesiluje, vypněte vše a rezistorem o odporu asi 33 Ω vybijte kondenzátory ve zdroji. Pomocné rezistory nahraďte pojistkami F1A. Zapněte znovu napájení a opět zkontrolujte poměry v zesilovači. Bez zátěže zkontrolujte limitaci signálu, musí být symetrická a bez zámkitů. Jinak tomu u zesilovačů tohoto typu ani nebývá.

Pak vypněte buzení a připojte zátěž 8 Ω . Na generátoru nastavte kmitočet 10 kHz a pomalu zvětšujte vstupní napětí tak dlouho, až na výstupu bude efektivní napětí asi 0,5 V. Nastavte trimrem P1 klidový proud právě tak, až zmizí přechodové zkreslení. Tento klidový proud bude asi 40 mA. Autor (pan Leach) doporučuje nastavit až 100 mA, ale podle mne je to zbytečně moc.

Nyní znovu zkontrolujte klidové napětí na výstupu bez vybuzení.

Pojistky F1A nahraďte odpovídajícími a můžete začít s výkonovými zkouškami zesilovače. Dosažený výkon P lze vypočítat podle vzorce $P = U_o^2/R_z$, kde R_z je odpor zátěže (8 Ω). Výstupní efektivní napětí U_o lze měřit při nízkých kmitočtech i multimetrem, záleží na jeho typu. Některé kvalitnější multimetry mají zaručenou přesnost až do 200 kHz, jiné zase měří správně jen při 50 Hz. Podívejte se do návodu ke svému multimetru.

Pak změřte výstupní napětí dosažené těsně před limitací. Ověřte chování zesilovače i při zátěži 4 Ω . Autor nedoporučuje dlouhodobě namáhat zesilovač plným výkonem při kmitočtech nad 20 kHz, ale i takové zkoušky tyto zesilovače přežily. Dokonce v původním pramenu je zmínka o využití zesilovače pro buzení výkonových ultrazvukových měničů kmitočtem 40 kHz.

Během delšího zatížení při kmitočtu 1 kHz kontrolujte ohřev tranzistorů a chladiče a popř. také nastavte bod spínání ventilátoru nuceného chlazení.

I zde platí „těžko na cvičišti, lehký na bojišti“. Pokud bude zesilovač spolehlivý při dlouhodobém extrémním sinusovém vybuzení, pak můžete mít jistotu, že vydrží „hudební“ režim.

Po oživení koncového stupně můžete propojit jeho vstup s výstupem oživeného elektronického předzesilovače a zahájit zkoušky celého kompletu. Jistě se nevyskytnou nějaké problémy. Nejprve zkoušejte raději bez zátěže. Kontrolujte odstup brumu a oscilace při vytočených potenciometrech korekcí a hlasitosti. Se šumem vstupních elektronek při vytočeném potenciometru GAIN nelze nic udělat, ale je v provozu minimální a neslyšitelný.

Pak namontujte na skříňku zesilovače krycí víka, nechte celý zesilovač pracovat do zátěže a kontrolujte jeho tepelné poměry.

(Zbývající část tohoto článku, v níž budou popsány modul koncového zesilovače o výkonu 300 W/4 Ω , reproduktorové skříňe pro hudebníky a hudební nástroj theremin, bude otištěna v KE2/2004)

Kontakt na autora

Na veškeré dotazy odpoví autor V. Voráček, OK1XVV elektronickou poštou na adrese: v.voracek@seznam.cz
Internetové stránky prof. Leache jsou: <http://users.ece.gatech.edu/~mleach/lowtim/>